

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301
Studijní obor: 3911T016

Strojní inženýrství
Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv Laser Shock Peening (LSP) na mechanické vlastnosti oceli

Autor: **Bc. Petr PAPEŽ**

Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Antonín KRÍŽ, IWE**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr PAPEŽ**

Osobní číslo: **S17N0051P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Vliv Laser Shock Peening (LSP) na mechanické vlastnosti oceli.**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popis a charakteristika technologie LSP.
2. Využitelnost technologie v energetice a dalších oborech.
3. Vytipování vhodných zkoušek pro hodnocení vlivu LSP na mechanické a fyzikální vlastnosti.
4. Experimentální program na vybraných materiálech.
5. Diskuze výsledků.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Ding K and Ye L *Laser shock peening, Performance and process simulation*, Woodhead Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals and Mining, Cambridge England, Spring 2006

Claurer A.H, Gregory J.K., Rack H.J, and Eylon D(eds) *Laser shock peening for fatigue resistance. Proceedings of Surface Performance of Titanium*, TMS, Warrendale, PA. Metal Society of AIME,217-30

Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement (MRP-267, Revision 2), EPRI Project, July 2016

Maawad E, Brokmeier H, Wagner L, Sano Y &Genzel C, *Surf. Coat. Technol.* 205, p 3644-3650 (2011)

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Zbyněk Špirit**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2018

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 vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Papež	Jméno Petr		
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv Laser Shock Peening (LSP) na mechanické vlastnosti oceli			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	75	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce je zaměřena na technologii laser shock peening. V první části práce jsou popsány principy, vlivy na materiál, využitelnost a ekonomické hodnocení technologie. Také jsou popsány metody měření zbytkových napětí. V experimentální části probíhá ověření vlivů LSP na materiál. Jsou zde měřeny zbytková napětí a mikrotvrdomosti a jejich průběhy pod povrchem materiálu. Dále je zkoumána jakost povrchu Ra a je provedeno hodnocení mikrostruktury.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Laser Shock Peening, LSP, zbytkové napětí, povrch, mikrotvrdomost, pulsní laser, rentgenová tenzometrie, XRD

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Papež	Name Petr	
FIELD OF STUDY	3911T016 Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of Laser Shock Peening (LSP) on mechanical properties of steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	75	TEXT PART	75	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The work is focused on laser shock peening technology. In the first part of the thesis are described principles, influences on material, usability and economic evaluation of technology. Methods for measuring residual stresses are also described. In the experimental part, the effects of LSP on the material are verified. There are measured residual stresses and microhardness and their course under the material surface. Further, the surface quality of Ra is investigated and microstructure is evaluated.
KEY WORDS	Laser Shock Peening, LSP, residual stress, surface, microhardness, pulse laser, X-ray diffraction technique, XRD

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Centra výzkumu Řež s.r.o., SUSEN Plzeň, ČR. Poděkování patří také centru výzkumu NTC, za umožnění měření zbytkového napětí pomocí rentgenové tenzometrie a konkrétně Ing. Michalu Kolegovi, Ph.D. za čas strávený měřením. Dále bych rád poděkoval centru HiLASE za možnost vidět technologii laser shock peening na živo. V neposlední řadě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE a konzultantovi Ing. Zbyňku Špiritovi za cenné rady a připomínky.

Obsah

Úvod	8
1 Popis a charakteristika technologie LSP	8
1.1 Princip LSP	10
1.2 Použití.....	11
1.3 Účinky LSP	12
1.3.1 Metalurgické změny vyvolané LSP	12
1.3.2 Únavové vlastnosti.....	13
1.3.3 Pevnostní parametry.....	14
1.3.4 Korozní vlastnosti	15
1.4 Laserové systémy používané pro LSP [5].....	16
1.5 Výhody na nevýhody technologie LSP	16
2 Metody zpevňování povrchu.....	17
2.1 Kuličkování	17
2.1.1 LSP vs. Kuličkování	18
2.2 Válečkování.....	19
2.3 Metody HFMI	20
3 Využitelnost LSP v energetice	20
3.1 Lopatky parních turbín	20
3.2 Jaderné reaktory	21
3.2.1 BWR reaktory	21
3.2.2 PWR reaktory.....	22
4 Ověřování vlivu LSP na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu.....	24
4.1 Měření zbytkových napětí.....	25
4.2 XRD metoda.....	25
4.3 Magnetické metody	26
4.4 Ultrazvukové metody	26

4.5	Odvrtávací metoda	27
4.6	Porovnání XRD a odvrtávací metody pro měření po LSP	29
5	Ekonomické hodnocení technologie LSP	30
	Experimentální část	31
6	Experimentální materiály	31
6.1	Materiál 08CH18N10T	32
6.2	Materiál 14CH17N2	32
7	Vzorky	33
8	Měření zbytkových napětí	35
8.1	Metoda $\sin^2\psi$	36
8.2	Příprava vzorků	37
8.3	Naměřené hodnoty	39
8.3.1	08CH18N10T	40
8.3.2	14CH17N2	41
9	Měření mikrotvrdosti	46
9.1	Naměřené hodnoty	46
9.1.1	08CH18N10T	46
9.1.2	14CH17N2	51
10	Měření jakosti povrchu Ra	56
10.1	Naměřené hodnoty	57
10.1.1	08CH18N10T	57
10.1.2	14CH17N2	58
11	Hodnocení mikrostruktury	59
11.1	08CH18N10T	60
11.2	14CH17N2	64
12	Diskuse výsledků	68
	Závěr	73

Úvod

V průmyslové praxi jsou laserové technologie hojně využívány. Typické příklady použití jsou například dělení materiálu, svařování a tepelné zpracování materiálu. Dynamicky rozvíjející se oblastí je zejména zpracování materiálů za účelem ovlivnění mechanických vlastností. Mezi takové technologie patří právě Laser shock peening (LSP). Jedná se o metodu, která vyvolává v povrchu a podpovrchové vrstvě materiálu zbytkové tlakové napětí a tím přispívá ke zlepšení mechanických vlastností, především zvýšení meze únavy materiálů a tím prodloužení životnosti strojních součástí.

Cílem této práce je představení technologie LSP a ověření jejích základních vlivů na vybrané materiály používané v jaderné energetice.

Začátek práce popisuje princip technologie, obecné možnosti využití, účinky na strukturu materiálu a jeho vlastnosti, vhodné laserové systémy použitelné pro LSP, výhody a nevýhody technologie. Dále jsou popsány další technologie vyvolávající stejné nebo podobné změny v materiálu a jeho vlastnostech. Je pojednáno o konkrétním využití LSP v energetice, na parních turbínách a v jaderných reaktorech. Jedním z hlavních účinků technologie LSP je vyvolání tlakového zbytkového napětí v materiálu. Proto jsou popsány některé metody měření zbytkových napětí v materiálu. Velikost a průběh zbytkového napětí je měřítkem vlivu technologie Laser shock peening na materiál, proto jsou tyto metody důležité pro další experimentální část práce. V závěru teoretické části je nastíněna finanční stránka věci, kde jsou vypsány náklady na pořízení všech potřebných zařízení a také na jejich provoz.

Druhá polovina práce je zaměřená na ověření základních vlivů technologie LSP na materiál, které jsou popsány v první části. Jsou vybrány konkrétní materiály používané v jaderné energetice, na nichž je provedeno měření zbytkových napětí, měření mikrotvrdosti, měření jakosti povrchu Ra a hodnocení mikrostruktury. Každý z testovaných materiálů je laserově zpracován třemi způsoby. Hodnoty naměřených veličin pro různě ošetřené materiály jsou pak mezi sebou porovnány.

1 Popis a charakteristika technologie LSP

Vlastnosti povrchových a podpovrchových vrstev významně ovlivňují vlastnosti materiálu, potažmo součástí z něj vyrobených. Důvodem je iniciace lomů na povrchu materiálu. Nejčastějším typem lomů vzniklých za provozu je únavové porušení materiálu. Na povrch materiálu působí mnoho vnějších a vnitřních vlivů, které se mohou podílet na vzniku porušení materiálu. Celkový stav povrchu je komplexním souhrnem všech těchto vlivů a souvislostí mezi nimi. Mezi vnější vlivy patří mechanické namáhání např. provozní napětí, chemické namáhání např. koroze a fyzikální namáhání, např. tepelné namáhání a především jejich kombinace. Vnější vlivy udávají okrajové podmínky pro použití součástí. Vnitřními vlivy jsou zbytková napětí, morfologie povrchu, mechanické vlastnosti povrchu a jeho struktura. Vnitřní vlivy lze ovlivnit při návrhu a výrobě součástí. Jednou z možností jako ovlivnit vnitřní vlivy působící na povrchové a podpovrchové vrstvy, je použití technologie Laser shock peening.

Zbytkové napětí je definováno, jako víceosé napětí, které působí v materiálu dlouhodobě i přes to, že na materiál již nepůsobí žádné vnější síly ani teplotní gradient. Zbytková napětí mohou být tahová, nebo tlaková. Z hlediska zamezení vzniku trhliny je výhodné zbytkové napětí tlakové, které má tendenci případné trhliny uzavírat. Naopak tahové zbytkové napětí má snahu trhliny rozevírat a napomáhat tak v jejich šíření. Morfologie povrchu udává místa iniciace trhlín. Každá nerovnost na povrchu součásti může iniciovat trhlínu. Z toho důvodu není příliš důležitá průměrná hodnota drsnosti povrchu Ra. Technologií Laser shock peening lze ovlivnit vnitřní vlivy působící na povrchové a podpovrchové vrstvy materiálu. [14]

LSP vyvíjí, pomocí paprsků pulsního laseru, mechanickou sílu na povrch součásti. Paprsky vysokoenergetického pulzního laseru v kontaktu s krycí vrstvou na povrchu vytvoří rázovou vlnu, která v materiálu vyvolá plastickou deformaci. Tím přeměňují zbytkové tahové napětí, které vzniká typicky při třískovém obrábění, ale také při tepelném zpracování nebo jiných technologických procesech, na tlakové a vytvrzují povrch. [2] Princip vzniku rázových vln bude popsán v kapitole 1.1.

Velikost zbytkového napětí závisí na parametrech LSP. Velikost zbytkového napětí v povrchové i podpovrchové vrstvě je přímo úměrná intenzitě laseru. Po překročení určité hodnoty intenzity laseru se velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě začne snižovat. Velikost zbytkového napětí je závislé také na počtu „vrstev“, tzn. počtu aplikací technologie opakovaně na stejné místo, nemusí zde však platit přímá úměra. Při zvýšení intenzity laseru, případně opakované aplikaci na stejné místo dochází také k větším změnám morfologie povrchu, struktury a mechanických vlastností z důvodu větší energie rázových vln, které tyto změny vyvolávají. [2]

Tlakové napětí vytvořené pomocí technologie LSP v povrchové vrstvě zasahuje hlouběji pod povrch materiálu, než při použití konvenčních metod. Díky této skutečnosti dosahuje součást zpevněná pomocí LSP vyšší meze únavy. [2]

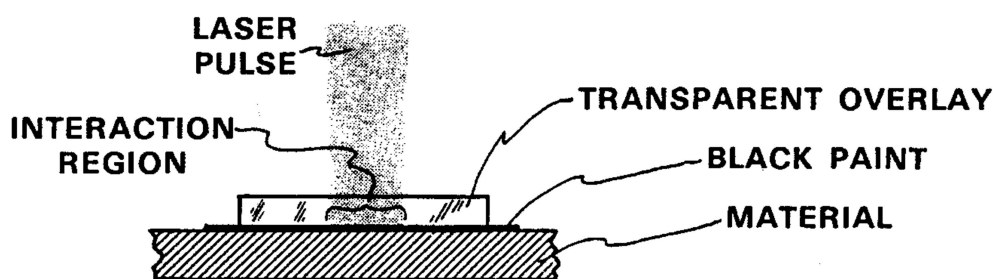
Při LSP dochází pouze k mechanickému zpracování povrchové vrstvy, a přesto že se jedná o zpracování pomocí laseru, nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu - nejedná se o tepelné zpracování. Povrch součásti totiž není vystaven přímo působení laserových paprsků, ale je chráněn dvěma krycími vrstvami. První vrstva nepustí paprsek až k povrchu materiálu a druhá, typicky voda, povrch materiálu ochlazuje. [2] Význam a složení krycích vrstev budou dále popsány v kapitole 1.1.

Laser peening může být použit v kombinaci s jinými technologiemi, jako např. kuličkovaní nebo v kombinaci s různými povlaky. [2]

1.1 Princip LSP

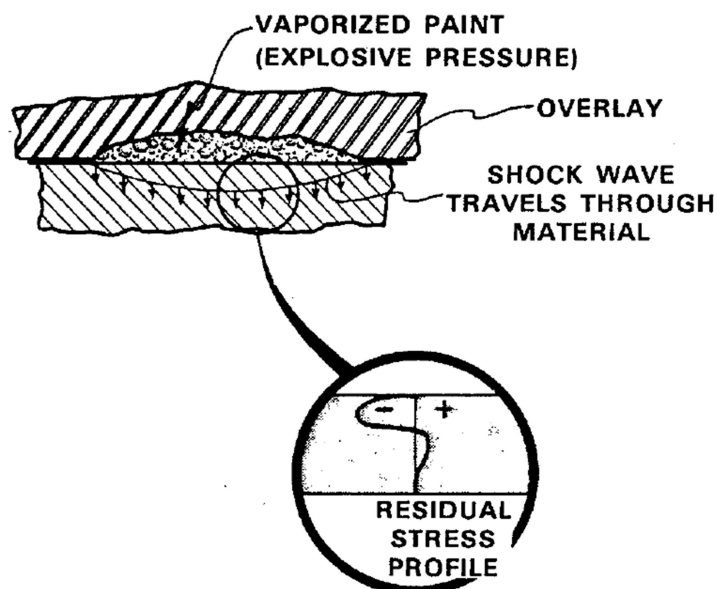
Používá se vysokoenergetický pulsní neodymový laser, který produkuje velmi krátké pulzy v rozmezí 15 – 30 ns o vlnové délce 1064 nm a energií od 50 J na každý pulz. Paprsek je na povrch součásti veden pomocí optického řetězce složeného ze zrcadel a čoček případně optických vláken. [2]

Při LSP je zpracovávaná část povrchu lokálně zakryta dvěma vrstvami. První vrstva je pro laserový paprsek neprůchodná a dává se přímo na povrch materiálu. [2] Tato vrstva je nejčastěji tvořena páskou na bázi polyvinylchloridu (PVC), která je na povrch přilepena kaučukovým lepidlem. Tato vrstva odolává vysokému napětí a teplotě a je schopná absorbovat energii laseru. [15] Druhá vrstva je transparentní a umožňuje průchod laserového paprsku, tato vrstva překrývá první, nepropustnou vrstvu. [2] Transparentní vrstva je tvořena zpravidla vodou, někdy může být tvořena také kyselinou fluorovodíkovou (HF). [15] Uspořádání vrstev na povrchu materiálu je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1: Uspořádání vrstev na povrchu materiálu při LSP [2]

Laserový paprsek projde transparentní vrstvou a narazí na nepropustnou vrstvu. Po nárazu paprsku na nepropustnou vrstvu dojde k jejímu okamžitému odpaření, vzniklá pára dále absorbuje energii laseru, začne se rychle zahřívat na více než 10 000 °C a díky ionizaci se přemění na plazmu. Vzniklá plazma dále pohlcuje energii laseru a expanduje. [5] Transparentní vrstva zadrží expandující páru a vzniklý plazmat na povrchu součásti, tím dojde k prudkému nárůstu tlaku. Pokud by nebyla transparentní vrstva použita, nebyl by nárůst tlaku tak prudký. Nárůst tlaku vyvolá rázovou vlnu, která se šíří pod povrch materiálu. Na Obr. 2 je znázorněno šíření tlakové vlny a průběh zbytkového napětí v povrchové vrstvě materiálu. Pokud je špičkové napětí vyvolané tlakovou vlnou vyšší než dynamická mez kluzu materiálu, materiál se plasticky deformuje. Jak tlaková vlna postupuje hlouběji do materiálu, její špičkové napětí klesá. Hloubka vrstvy, která je plasticky deformovaná odpovídá hloubce, kde dojde k vyrovnání špičkového napětí vlny a dynamické meze kluzu materiálu. Plastická deformace vyvolá v povrchové vrstvě materiálu objemové změny, které vyvolají vnitřní elastické deformace. Velikost zbytkového napětí závisí na velikosti těchto vnitřních elastických deformací a na Youngově modulu pružnosti v tahu E , pro daný materiál. Vedle vzniku zbytkových napětí zároveň dochází k deformačnímu zpevnění povrchu. [2]



Obr. 2: Efekt LSP na povrch materiálu [2]

1.2 Použití

Obecně se LSP používá pro zvýšení meze únavy strojních součástí.

LSP je používáno zejména pro kovové materiály. [1] Mezi materiály, které jsou běžně pomocí LSP zpracovávány patří oceli, slitiny hliníku, slitiny titanu, superslitiny na bázi niklu, litiny a slinované materiály. [2] Laser shock peening je také možné využít ke zpracování biokompatibilních materiálů využívaných ve zdravotnictví. [1]

Tato technologie je využívána zejména v leteckém průmyslu a v energetice. Používá se pro lopatky turbín, ventilátorů a kompresorů, součásti rotoru, části jaderných reaktorů, ložiska a ozubení. Pomocí LSP jsou ošetřovány svarové spoje, které z konstrukčního hlediska představují vrub. Technologie je využívána také v automobilovém a zbrojním průmyslu. Potenciální oblast využití je ve zdravotnictví – pro ortopedické implantáty. [5]

Technologii lze použít na již dokončenou součást, nebo jí zařadit před dokončovací operace. Lze zpracovat vnější i vnitřní plochy, na které je přímá viditelnost. Použití na plochy, na které není přímá viditelnost, může být značně složité a řešení je vždy specifické podle daného případu. [2]

Technologie LSP umožňuje zpracovat pouze místa na povrchu součásti, které jsou nejvíce náchylná k únavovému porušení, a není přitom nutné „zakrývat“ okolní oblasti, které nemají být zpracovány. To umožňuje lokalizovanou úpravu kolem otvorů a drážek, ve svarech a dalších vysoce namáhaných oblastech. Díky flexibilitě procesu je možné technologii využít pro širokou škálu geometrií a velikostí dílů, to však může přinášet vyšší nároky na použitá zařízení a přípravky. [2]

Intenzita LSP může být snadno kontrolována a monitorována, což umožňuje přizpůsobení procesu specifickým výrobním nebo servisním požadavkům pro různé součásti z různých materiálů. Řídicími parametry jsou intenzita laserového paprsku, která se reguluje na zdroji záření a ohnisková vzdálenost, kterou regulujeme jednak tzv. spot-size, čili velikost oblasti zasažené jedním pulsem laserového paprsku a hustotu energie záření na danou plochu. [2]

Požadovaná velikost ošetřované plochy závisí na konstrukci součásti a na podmínkách jejího provozu. Někdy se ošetřuje jen malá část v okolí vrubu, existují aplikace, kde se zpracovává celý povrch součásti, např. lopatka turbíny. [2]

Při zpracování tenkých průřezů může být paprsek rozdělen na dva paprsky o stejné intenzitě a ty pak současně narazí na protilehlé plochy součásti. Pokud je zpevňovaná součást dostatečně tenká, dojde ke zpevnění v celém jejím průřezu. [2]

1.3 Účinky LSP

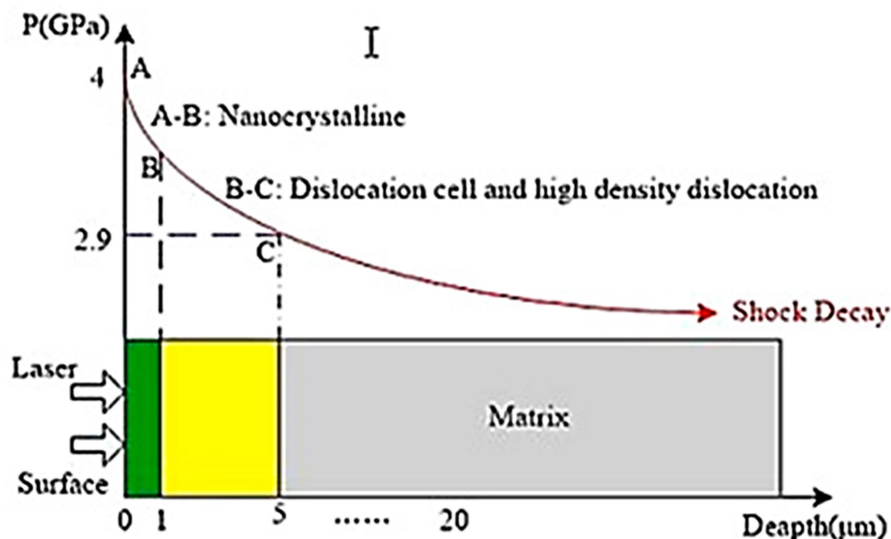
LSP ovlivňuje mechanické vlastnosti povrchové vrstvy a zároveň vytváří plastické deformace povrchu. Má vliv na odolnost povrchu proti opotřebením, na kluzné vlastnosti, mez únavy, korozní odolnost aj. Rázové vlny také vyvolávají změny mikrostruktury a zvyšují hustotu dislokací v okolí povrchu. Kombinace změny mikrostruktury a zvýšení hustoty dislokací přispívají ke zlepšení mechanických vlastností povrchu. [1]

Účinky mechanické síly na samotný povrch jsou minimální. U měkkých slitin, dochází na povrchu k vytvoření reliéfu a tím dochází ke snížení hloubky zpevněné vrstvy. U hliníkových slitin se hloubka reliéfu pohybuje okolo 6 μm . Naopak na obrobených plochách tvrdších slitin je obtížně viditelné, v kterých místech byl povrch vystaven působení laseru. [2] Řízené vzorování povrchu zlepšuje odolnost proti opotřebením, tření a mazání. Reliéf na povrchu zachycuje mazivo a přispívá tak k udržení mazacího filmu na povrchu. Zároveň v něm ulpívají částice vzniklé opotřebením a snižuje se otěr. Reliéf zvyšuje životnost kontaktních ploch, protože snižuje koeficient tření. Jiné metody pro vytvoření reliéfu na povrchu součásti, jako např. mikro vrubování, mikro vrtání nebo laserová ablace způsobují poškození povrchu a tím zkracují životnost součásti. [1]

1.3.1 Metalurgické změny vyvolané LSP

LSP způsobuje plastickou deformaci v povrchové vrstvě materiálu a tím vyvolává žádoucí mikrostrukturní změny, zejména zjemnění struktury. Mimo to dochází ke změně orientace krystalů, převrácení mřížky, hromadění dislokací, skluzu dislokací, dvojčet a jiným defektům krystalové mřížky. Ke zjemnění struktury přispívá také vysoká rychlost tlakových rázových vln. Touto modifikací mikrostruktury dochází k zlepšení mechanických vlastností materiálu. Na pozorování změn mikrostruktury byly provedeny různé studie. Ty prokázaly vliv LSP na mikrostrukturní změny, zejména na zvýšení hustoty dislokací a plošných poruch. Zvýšení hustoty těchto mřížkových poruch je důsledkem zjemnění struktury. Jemnozrnná struktura obsahuje větší počet hranic zrn než původní hrubší struktura. Hranice zrn tvoří překážky v pohybu dislokací. Zvýšením počtu hranic zrn tudíž dochází k většímu počtu interakcí právě

mezi hranicemi zrn a dislokacemi a tím k nárůstu hustoty dislokací. Zvýšení hustoty dislokací vede ke zvýšení tvrdosti a pevnosti povrchu. S nárůstem tlaku rázové vlny se nahuštěné dislokace přeměňují na dislokační buňky. [5] Průběh strukturních změn pod povrchem materiálu je naznačen na Obr. 3, zde se jedná o slitinu na bázi Ti-Al, ale lze předpokládat, že průběh bude podobný i pro odlišné materiály, pouze se budou lišit hodnoty na osách x a y.



Obr. 3: Průběh strukturních změn pod povrchem materiálu na bázi Ti-Al [5]

1.3.2 Únavové vlastnosti

LSP je nová metoda průmyslové úpravy povrchu ke zlepšení únavových vlastností kovů. Tlak rázové vlny způsobí objemové změny v povrchové vrstvě materiálu, které vyvolají vnitřní tlakovou elastickou a plastickou deformaci, která v materiálu zůstává i po odeznění tlakové vlny, čili tlakové zbytkové napětí v povrchu. Je to podobný princip jako u tryskání, při kterém je povrch bombardován např. kovovými kuličkami. [5]

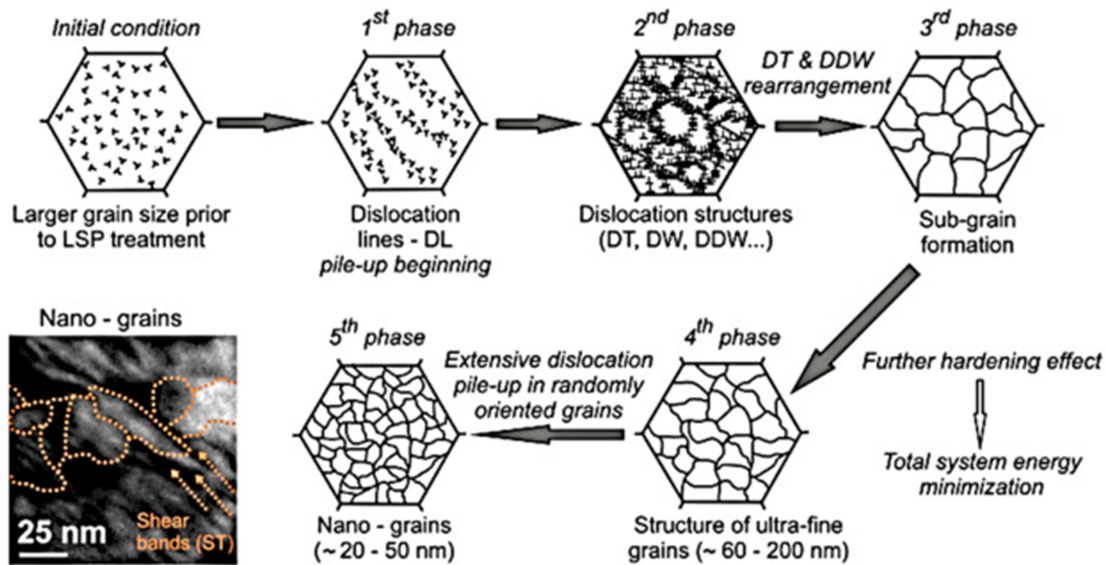
Zvýšení meze únavy je dosaženo zbytkovým tlakovým napětím, které vzniká v povrchové vrstvě a má tendenci uzavírat potenciální trhliny a vruby na povrchu součásti. Nejvyšší hodnota tlakového napětí je zpravidla na povrchu součásti a klesá s hloubkou. [1]

LSP snižuje drsnost povrchu. Ačkoli při LSP vzniká na povrchu reliéf, je prokázáno, že výsledná drsnost povrchu je nižší než u neošetřeného vzorku. Snížení drsnosti povrchu je další z faktorů, který vede ke zvýšení únavové životnosti, protože jakostnější povrch znamená méně míst iniciace trhliny. [5]

1.3.3 Pevnostní parametry

Rázové vlny v nanosekundovém rozsahu s hustotou výkonu větší než 109 W/cm^2 mění mikrostrukturu povrchu a mechanické vlastnosti, jako je tvrdost a mez únavy. Špičkový tlak rázové vlny dosahuje hodnoty několik GPa. Plastická deformace nastává v místě dopadu laserového paprsku. Vrstva plastických deformací se skládá ze dvou částí – vrstva silných plastických deformací a vrstva malých plastických deformací. Ve vrstvě silných plastických deformací dochází ke zjemnění zrna. Právě zjemnění zrna má vliv na zvýšení pevnostních parametrů materiálu. Dle Hall-Patchova vztahu je mez kluzu nepřímo úměrná velikosti zrna, čili čím jemnější zrno, tím větší mez kluzu. Zvýšení mechanických vlastností je tedy závislé především na mechanismech plastické deformace a zjemňování zrna. LSP zlepšuje i odolnost materiálu proti tečení. Na odolnost proti tečení má vliv také zjemnění struktury, resp. zvýšení počtu překážek (hranic zrn) v pohybu dislokací, protože creepové mechanismy jsou založeny právě na skluzu dislokací. Zjemňování zrna se skládá z pěti fází, které jsou znázorněny na Obr. 4. [5]

1. fáze – vysokoenergetické plazmové a rázové vlny podporují tvorbu dislokačních pásů a pohyb dislokací v původních zrnech.
2. fáze – opakovaná plastická deformace zvyšuje napětí a stupeň deformace, které vedou k pohybu dislokací podél dislokačních rovin a křížovému skluzu, tím vznikne vysoká koncentrace dislokací. Následně dojde k vytvoření zcela náhodných dislokačních struktur ve formě dislokačních čar, dislokačních stěn (DDW), a dislokačních buněk, které blokují další skluzu vyvolané namáháním.
3. fáze – plastická deformace se zvětšuje a roste napětí, což vede k rozpadu původních zrn na subzrna.
4. fáze – celková energie vzniklá opakujícími se rázovými vlnami, je minimalizována zánikem dislokací a vznikem několika smykových pásem, které dále rozdělují subzrna na ještě jemnější zrna s vysokými úhly hranic zrn.
5. fáze – velké množství napětí rozšiřuje hranice subzrn a způsobuje jemnozrnné struktury. V konečné fázi procesu zjemňování zrna probíhá dynamická rekrytalizace (DRX), což zapříčiní vznik nano-krystalické povrchové vrstvy prakticky bez dislokací.



Obr. 4: Fáze zjemňování zrna v povrchové vrstvě při LSP [5]

LSP zlepšuje mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách. Zvyšuje se mez kluzu a mez pevnosti v tahu při vysokých teplotách. [5]

Ultrajemné zrno a dvojčata vzniklá při LSP vedou ke kombinaci vysoké pevnosti a tažnosti. Zvyšuje se poměrné prodloužení a pevnost v tahu. U konvenčních deformačních metod, jako je např. válcování, protlačování nebo tažení se zvyšuje pevnost, ale tažnost se snižuje. Skutečnost, že u LSP se obě tyto hodnoty zvyšují je přičítána ultrajemné struktuře. [5]

1.3.4 Korozní vlastnosti

Materiály ošetřené technologií LSP jsou méně náchylné ke korozi a pittingu. LSP také zvyšuje odolnost proti mezi-krytalové korozi, zejména u nerezových ocelí, které jsou na ní nejvíce náchylné. [5]

LSP nemění pasivitu materiálu. Pasivační vrstva je vlivem působení rázových vln ztenčena, ale stává se kompaktnější a odolnější. [5]

Účinky LSP nemají vliv na aktivační energii koroze. Nicméně materiál ošetřený LSP, který bude mít v povrchu a povrchové vrstvě tlakové zbytkové napětí, bude při stejné aktivační energii odolávat korozi lépe, než stejný, ale neošetřený materiál s tahovým, případně nízkým tlakovým zbytkovým napětím. Tlakové napětí totiž povrch uzavírá a brání tak korozi postupovat hlouběji do materiálu. Naopak tahové napětí v povrchu rozevívá trhliny a póry a umožňuje tak šíření koroze do materiálu.

1.4 Laserové systémy používané pro LSP [5]

Výběr vhodného laserového systému je nezbytný pro správný průběh procesu LSP.

Pro LSP se používají tzv. Q-switched lasery. Q-switched laser má elektro-optický přepínač, který zajišťuje impulzní výstupní parsek. Laserové paprsky jsou generovány nejčastěji pevnolátkovým neodýmovým – Nd:Glass, nebo Nd:YAG laserem. Vlnová délka paprsků je nejčastěji 1064nm. Účinnost LSP může být zvýšena vysokou obnovovací frekvencí laserového impulsu a vhodnou vlnovou délkou. Je vyžadován krátký, intenzivní, fokusovaný laserový impuls.

Tlakový ráz vyvolaný plazmou je funkcí intenzity laseru. Zvýšením intenzity laseru se zvyšuje velikost rázu. Intenzita laseru je tudíž nejdůležitějším parametrem LSP. Aby se dosáhlo vysoké intenzity laserového paprsku i u laserového systému, který má nižší výkon je nutné zmenšit velikost laserového paprsku, tzn., vysoký špičkový tlak může být generován i systémem s nízkou pulsní energií tím, že se zmenší bod laserového paprsku. Díky tomu se dají používat laserové systémy s relativně nízkou energií (50-750 mJ), což přináší zejména úsporu nákladů na pořízení systému.

Pro LSP se používají 3 vlnové délky. Jedná se o ultrafialové (UV) (355nm), zelené (532nm) a téměř infračervené (IR) (1064nm) záření.

1.5 Výhody na nevýhody technologie LSP

Laser shock peening má mnoho výhod. Patří mezi ně snadná obsluha, možnost lokálního použití a rychlost celého procesu. Další výhodou jsou nízké náklady na provoz. Díky nepropustné krycí vrstvě na povrchu nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Hloubka ovlivněné vrstvy je až 1 mm. Proces je plně kontrolovatelný a opakovatelný a výsledek záleží na nastavených parametrech, materiálu a geometrii zpracovávané součásti. LSP je vhodné pro zpracování velké škály materiálů. [5]

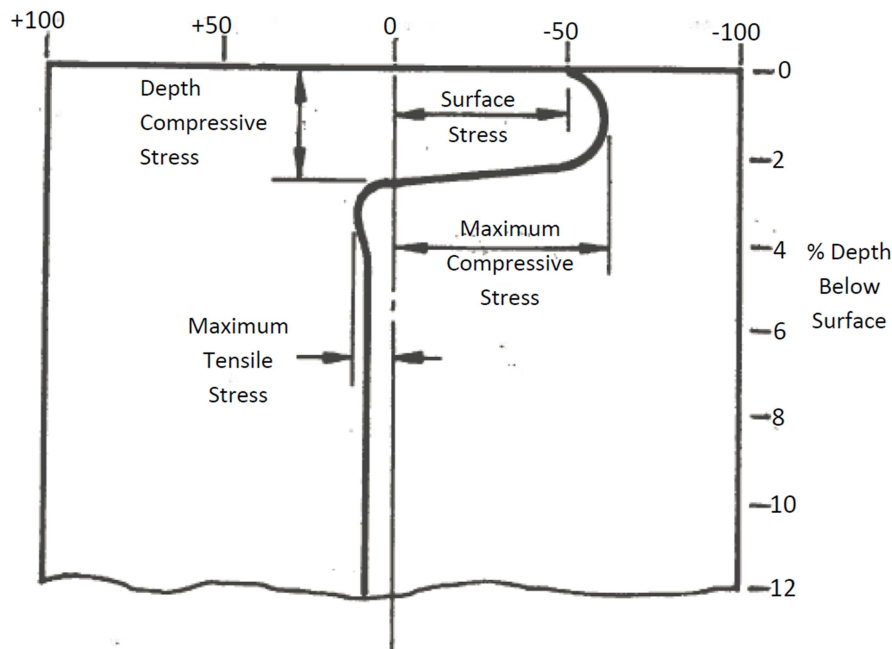
Mezi nevýhody této technologie patří zejména vysoká pořizovací cena zařízení, v řádech milionů Kč. Dále je nutná vysoká čistota pracovního prostředí. Pro opakované zpracování je nutné obnovovat nepropustnou krycí vrstvu, aby bylo zabráněno tepelnému ovlivnění materiálu, protože vlivem dopadu laserového paprsku dochází k jejímu odpařování – poškození. Řízení proměnných procesu může být obtížné, z důvodu složitosti laserového zařízení. Například při použití vody jako propustné vrstvy se její tloušťka může měnit v důsledku stříkání, a i přes přesné řízení výkonu laseru se můžou parametry paprsku na povrchu materiálu lišit. [5]

2 Metody zpevňování povrchu

2.1 Kuličkování

Kuličkování je proces probíhající za studena, při kterém dochází k ostřelování povrchu součásti malými prvky sférického tvaru. V místech, kde dochází ke kontaktu vystřeleného prvku s povrchem součásti, vzniká malý kráter. Každý náraz vnáší napětí do tenké vrstvy pod povrchem kráteru. Deformovaná vrstva má tendenci vrátit se do původního stavu a tím vzniká tlakové napětí. Ke zpevnění povrchové vrstvy dochází vlivem tlakového napětí, které v ní vzniká při plastické deformaci. Na povrch dopadají další částice. Po opakovaném dopadu částice na povrch, kde již došlo ke zpevnění, nedochází k dalšímu formování materiálu. V místech, kde ještě ke zpevnění nedošlo, vznikají další krátery. Tím postupně dochází k vytvoření povrchové vrstvy se zbytkovým tlakovým napětím. [6]

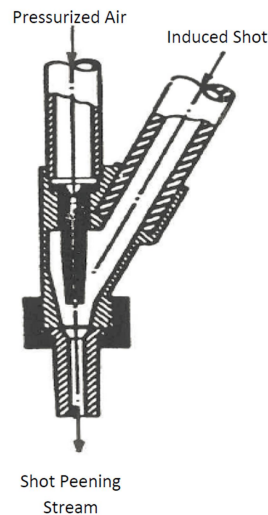
Na Obr. 5 je vidět průběh zbytkového napětí pod povrchem součásti po kuličkování. Maximální tlakové zbytkové napětí se rovná alespoň polovině pevnosti v tahu pro daný materiál. Těsně pod povrchem směrem do hloubky dochází k nepatrnému nárůstu tlakového napětí, to následně klesá na nulu a poté přechází v mírné tahové napětí. Tahové napětí musí vyrovnávat tlakové napětí, aby součást zůstala v rovnováze. Tahové napětí může vytvářet vnitřní trhliny v materiálu. [6]



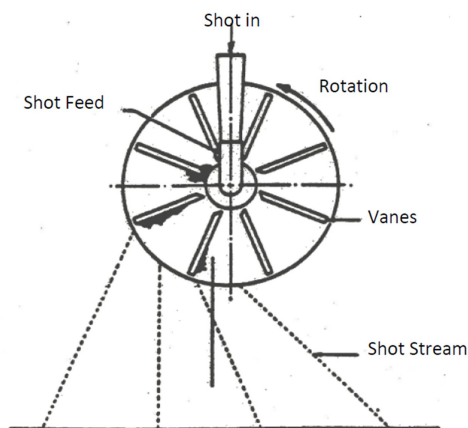
Obr. 5: Průběh zbytkového napětí v povrchové vrstvě po kuličkování [6]

Sférické částice používané při kuličkování se vyrábí disperzí proudu roztaveného kovu do proudu vody, vzduchu, nebo jiného média. Materiál částic je nejčastěji litina, nebo ocel. Jejich tvrdost by měla být větší než tvrdost tryskaného povrchu. [6]

Kuličkování probíhá nejčastěji v uzavřeném boxu, z důvodu prašnosti procesu a z bezpečnostních důvodů. Výhodou uzavřeného boxu je usnadnění opětovného využití kuliček. Kinetickou energii kuličkám uděluje proud vzduchu, vody, nebo metací lopatkové kolo. Kuličkovací zařízení se dělí do dvou hlavních skupin – tryskací stroje využívající kinetickou energii proudícího média (nejčastěji stlačeného vzduchu) viz Obr. 6 a odstředivé tryskací stroje viz Obr. 7. [6]



Obr. 6: Tryska kuličkovacího zařízení využívající kinetické energie stlačeného vzduchu [6]



Obr. 7: Kuličkovací zařízení využívající kinetické energie rotujícího metacího kola [6]

2.1.1 LSP vs. Kuličkování

LSP je nová metoda zlepšování vlastností povrchů, kterou je možné použít pro velmi specifické aplikace. [5]

Konvenční metody tryskání nedosahují takových hodnot, hloubky a průběhu zbytkového tlakového napětí jako LSP, a proto je míra prevence proti porušení součásti nižší. Rozložení zbytkového napětí pod ošetřeným povrchem není stejné, u LSP je ovlivněná vrstva až 4 krát

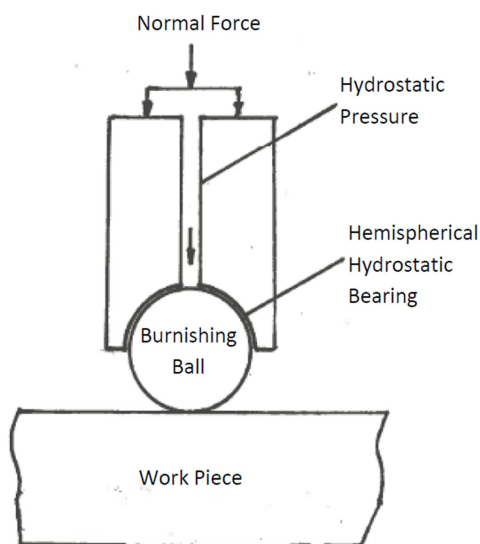
hlubší než u kuličkování. Pro dosažení stejné hloubky ovlivněné vrstvy klasickým tryskáním je potřeba vysoká intenzita tryskání, což ovšem způsobuje poškození povrchu. LSP nezpůsobuje významné změny povrchové topografie. Největší zbytkové napětí po LSP je obvykle přímo pod povrchovou vrstvou. Větší hloubka tlakového napětí je způsobena větší výdrží tlaku rázové vlny nad dynamickou mezí kluzu než u tryskání. [5]

Odolnost proti pittingu je u LSP také vyšší, nicméně i konvenční tryskání přináší zlepšení odolnosti proti lokálním druhům koroze, tím že vyvolá tlakové zbytkové napětí, které uzavírá povrch a brání postupování koroze do materiálu. Jakost povrchu stoupá u obou metod, avšak u LSP je dosahováno vyšších jakostí. [5]

2.2 Válečkování

Válečkování je metoda k vytvoření hluboké vrstvy s tlakovým zbytkovým napětím s využitím minimální práce. Proces válečkování probíhá za studena. [7]

Válečkování využívá tlaku válcovací kuličky nebo válečku na povrch součásti. Kulička je normálovou silou přitlačována k povrchu součásti, po které se odvaluje. Základním nástrojem je kulička uložená v hemisférickém hydrostatickém ložisku viz Obr. 8. Nástroj může být upnut v konvenčním soustruhu, nebo v CNC obráběcím nebo robotickém zařízení. U CNC obráběcích strojů se využívá chladící médium k natlakování hydrostatického ložiska. Kulička je přitlačovaná v normálovém směru k povrchu součásti hydraulickým válcem, který je součástí těla nástroje. [6], [7]



Obr. 8: Schéma válečkovacího nástroje [6]

Kulička se odvaluje po povrchu součásti. Dráha nástroje vyplývá z konstrukce stroje, v CNC zařízení může být určena programem. Vlivem působení normálové síly na kuličku při jejím odvalování po povrchu součásti vzniká plastická deformace povrchu a kus pod povr-

chem. Plasticky deformovaný materiál má tendenci k návratu do původního stavu a tím je deformovaná oblast vystavena tlakovému napětí. [6]

Při kuličkování nedochází k úběru materiálu, zlepšuje se drsnost povrchu – výsledný povrch je téměř zrcadlově lesklý. [6], [7]

2.3 Metody HFMI

Metody HFMI (High Frequency Mechanical Impact) patří mezi další metody zpevňování povrchu, založené na stejných principech jako předchozí popsané metody, které mechanicky vyvolanými nárazy na povrch materiálu způsobují objemové změny vyvolávající zbytkové tlakové napětí.

Tyto metody využívají ultrasonický pohyb nástroje a vzájemně se liší pouze tvarem pracovní části nástroje. Mezi tyto metody patří např. kladívkování. HFMI metody jsou využívány zejména pro ošetření svarových spojů, protože se dají provádět ručním zařízením, které je malé, mobilní a kompaktní a lze s nimi snadno manipulovat i v případě složitějších svařenců. [8]

Ultrazvukový generátor vytváří vysokonapěťový signál, který je převáděn na mechanické vibrace. Převod signálu na vibrace zajišťuje piezoelektrický nebo magnetostrikční převodník. Když je nárazové těleso (např. jehla) v kontaktu s povrchem součásti získává kinetickou energii a je přitlačována proti povrchu součásti. Při náražení vibrujícího tělesa na povrch dochází k plastickým deformacím povrchu, které vyvolávají tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě materiálu. [8]

3 Využitelnost LSP v energetice

3.1 Lopatky parních turbín

Únava je významným problémem, který omezuje životnost lopatek nízkotlakých parních turbín. Lopatky jsou vyráběny především z martenzitických ocelí nebo se slitiny Ti6Al4V, použitý materiál závisí na typu turbíny. Je prokázáno, že u lopatek vyrobených ze slitiny Ti6Al4V byla použitím metody LSP prodloužena životnost minimálně na dvojnásobek. [9] Tato skutečnost je přičítána hlubší zpevněné vrstvě a vyšší jakosti povrchu. V případě oceli DIN X20Cr13 přinesla technologie LSP jen částečné zlepšení oproti kuličkování. Při zkušebním napětí 550 MPa vykazovaly vzorky ošetřené LSP a kuličkováním srovnatelnou životnost. Při nižší hodnotě zkušebního napětí, konkrétně 400 MPa přineslo LSP zvýšení životnosti o 30%. [9]

Současný trend v energetice je zvyšování efektivity tepelných elektráren. To vede ke zvyšování teplot a tlaků v parních generátorech, čímž jsou kladeny vysoké nároky na materiál pohyblivých lopatek. Používají se titanové a niklové slitiny. I přes neustálý vývoj v konstrukci a materiálech pohyblivých lopatek přetrvává problém s iniciací únavového poškození v oblasti stomečkového závěsu v patě lopatky. Při vysokých otáčkách turbíny (3000

1/min) je pata lopatky zatížena kombinací odstředivé síly od rotace turbíny a oscilačního zatížení způsobeného tlakovou párou. Toto představuje problém zejména u parních turbín nad 500 MW (i 1300 MW), kde jsou lopatky delší než 1 m. Se zvětšováním výkonu generátoru roste velikost a zároveň i hmotnost lopatek, tudíž roste i zatížení v patě lopatky. Únavové porušení v patě lopatky je velkým problémem a může vést ke zkáze celé turbíny. Pro předcházení, nebo oddálení vzniku únavových trhlin se na kritická místa aplikují technologie způsobující tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Nejrozšířenější metodou je tryskání, které dosahuje hloubky zpevněné vrstvy zhruba 0,5 mm, navíc může na povrchu způsobovat vady, které následně slouží jako koncentrátoři napětí a místa iniciace únavových trhlin. Nově používaná technologie LSP dosahuje hloubky tlakového napětí až 1 mm, navíc tato technologie nezpůsobuje žádné nežádoucí povrchové vady. [9]

3.2 Jaderné reaktory

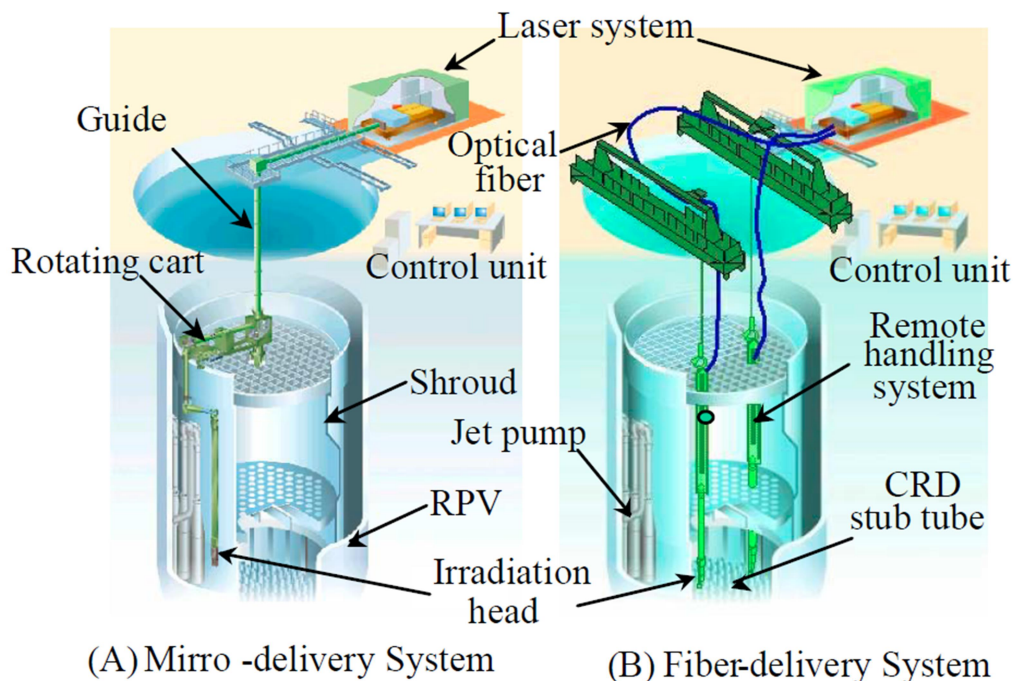
Jedním z hlavních faktorů snižujících spolehlivost komponent jaderných reaktorů je korozní praskání (SCC – stress corrosion cracking). V jaderném průmyslu byly materiály náchylné na tento typ koroze hojně využívány. Napadená místa je možné opravit svařováním, nebo výměnou komponent, tato řešení jsou však často složitá, nákladná a časově náročná. Vybroušení a vyvaření bývá často efektivní, ale v některých případech je oblast vystavena radiaci, která může ovlivnit kvalitu svařování a finální testování svarových vrstev. Proto jsou vyhledávána alternativní řešení, která by pomohla předcházet SCC. Korozní praskání obecně závisí na třech faktorech – náchylnost materiálu ke koroznímu praskání, korozní prostředí a statické tahové napětí. Eliminací alespoň některého z těchto faktorů klesá náchylnost k SCC. LSP je technologie, která eliminuje jeden z těchto faktorů, a sice tahové napětí v materiálu. [13] Jak funguje technologie LSP je popsáno v předchozích kapitolách. Technologie LSP je používána k eliminaci vzniku SCC na komponentách jaderných reaktorů od roku 1999 (společnost Toshiba). [13]

Výhodou použití LSP pro tuto aplikaci spočívá v tom, že probíhá pod vodou, což snižuje dopady radioaktivního záření. Skutečnost že LSP probíhá pod vodou má pozitivní dopad i na dobu odstávky. Laserové paprsky se navíc dostanou i do míst kde jiné metody není možné použít. Tyto výhody činí z LSP ideální metodu pro eliminaci SCC, jak v tlakových reaktorech (PWR – pressurized water reactor) tak i ve varných (BWR – boiling water reactor). [13]

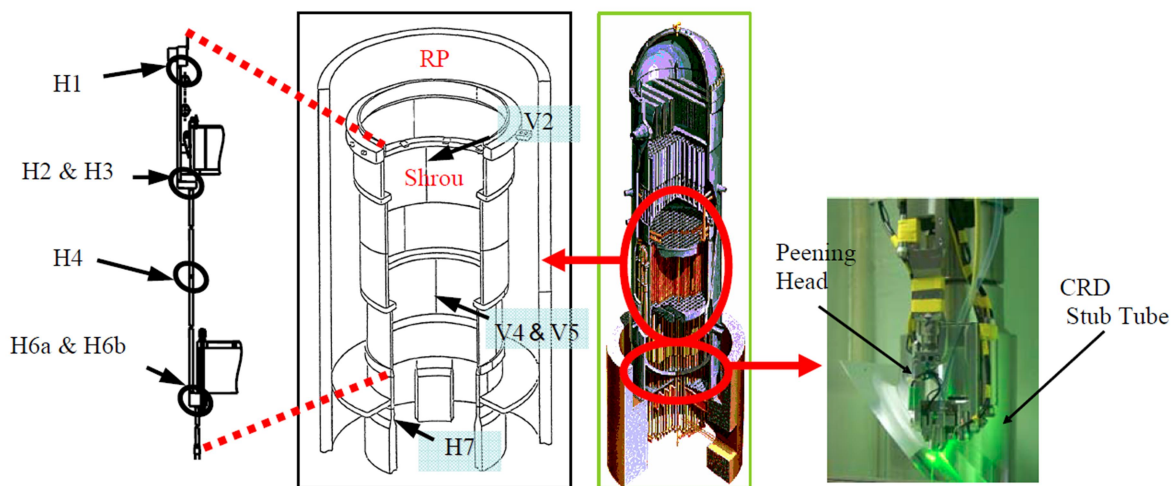
3.2.1 BWR reaktory

V posledním desetiletí proběhly velké pokroky v aplikaci LSP coby ochrany proti SCC na svařovaných komponentách v jaderných reaktorech. Nejprve se pro vedení laserového paprsku používala soustava zrcadel, toto řešení je zobrazeno v levé části Obr. 9. U tohoto systému byla přesnost řízení polohy laserového paprsku 0,1 mm na 40 m. Tento složitý optický

systém byl později nahrazen optickými vlákny, viz pravá část Obr. 9, která umožnila přenášet laserové pulsy o výkonu až 10 MW. [13]



Obr. 9: Použití LSP na reaktoru typu BWR [13]

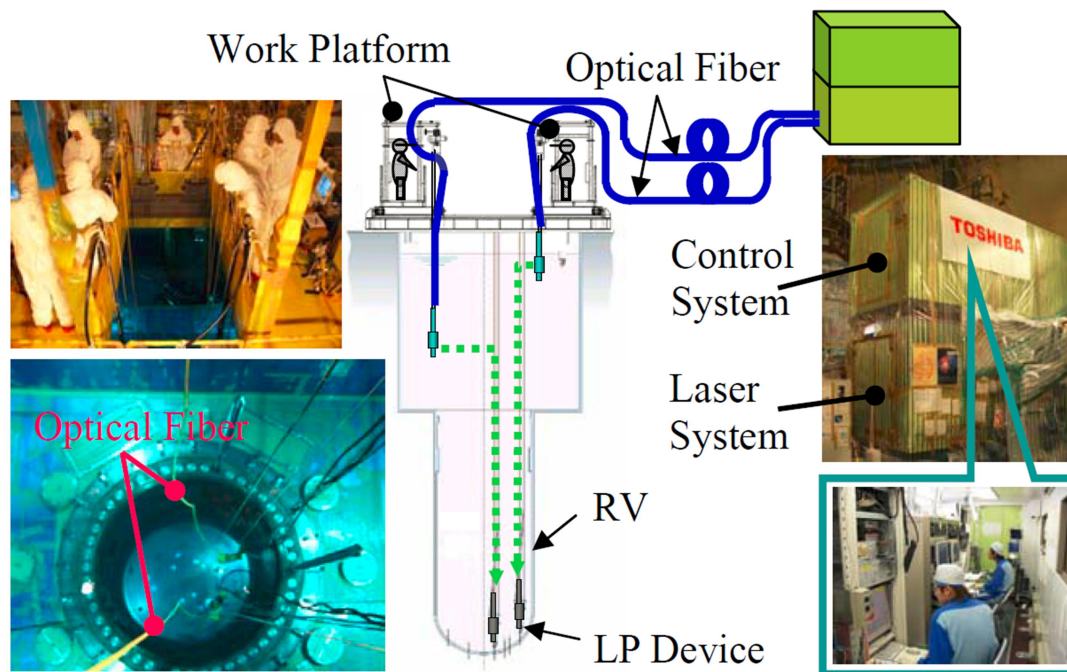


Obr. 10: Místa jaderného reaktoru typu BWR, kde je využívána technologie LSP [13]

3.2.2 PWR reaktory

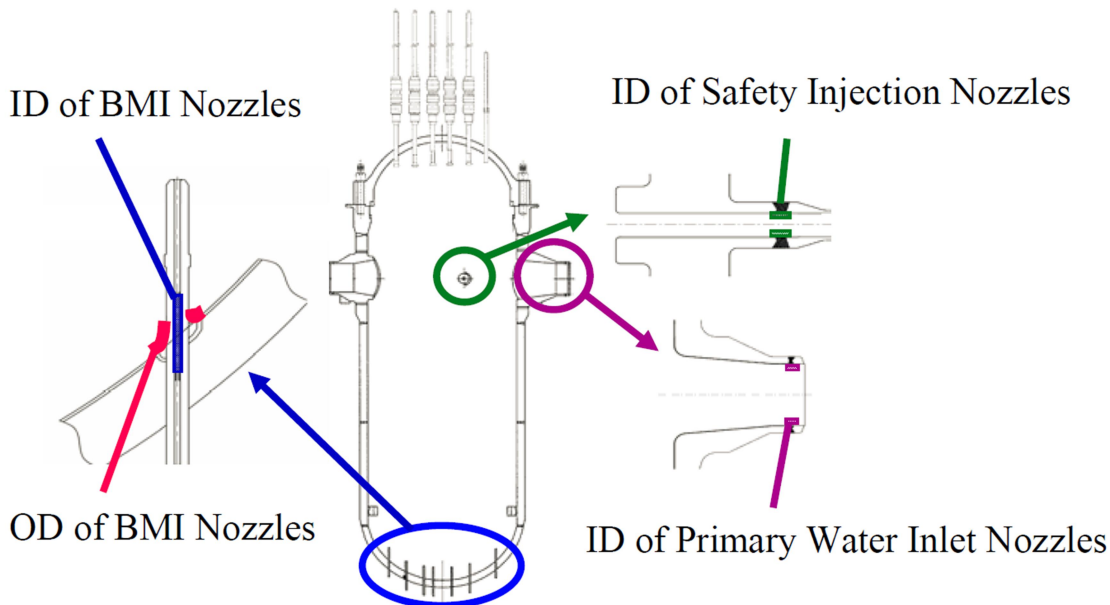
Na Obr. 11 je zobrazen systém LSP při použití na reaktoru typu PWR. U tohoto řešení je laserový a řídicí systém umístěny v kontejnerech, které jsou postaveny v místě, které je určeno pro výměnu paliva. Laserové impulzy jsou vedeny do určených míst pomocí dvou optických vláken. Tím je umožněno, že proces probíhá paralelně na dvou různých místech, tím

pádem se zkracuje doba procesu. Optická vlákna vedou laserové paprsky do pracovních hlav, které jsou zavěšeny pod pracovními plošinami. [13]

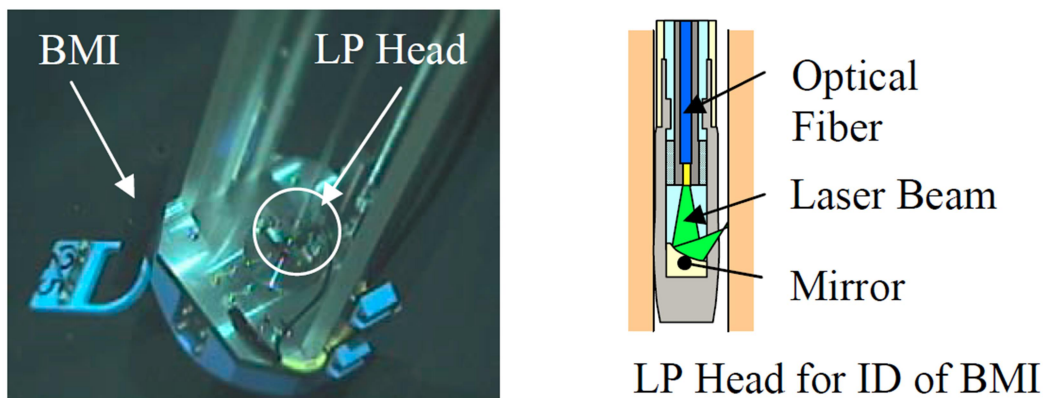


Obr. 11: Použití LSP na reaktoru typu PWR [13]

Na Obr. 12 jsou vyobrazena místa na PWR reaktoru, kde je technologie LSP aplikována. Vedle vnějšího a vnitřního povrchu $\frac{1}{2}$ U svarů na spodní straně BMI trysek, jsou to nehomogenní svary vstupních trysek primárního okruhu a bezpečnostní vstříkovací trysky. BMI trysky jsou vyrobeny ze slitiny NiCr15Fe (INCONEL 600) a k reaktorové nádobě (RV) jsou připraveny přídavným materiálem téhož složení. Vnitřní plocha svaru a povrch $\frac{1}{2}$ U svaru jsou náchylné na SCC. Vnitřní průměr BMI trysky má 10 mm, proto musela být navržena speciální pracovní hlava, která využívá odrazu laserového paprsku v konkávním zrcadle. Hlava je zobrazena na Obr. 13. Hlava se v trysce otáčí a vertikálně posouvá, ozařování probíhá po spirále. Hlava pro ozařování vnějšího povrchu BMI je připevněná k zřízení, které umožňuje 6ti-osý pohyb. Zařízení pro vstupní trysku primárního okruhu vody má dvě hlavy, které pracují současně, zařízení se otáčí a posouvá v ose trysky. Zařízení pro bezpečnostní vstříkovací trysky pracuje na stejném principu jako zařízení pro vstupní trysku. [13]



Obr. 12: Místa jaderného reaktoru typu PWR, kde je využívána technologie LSP [13]



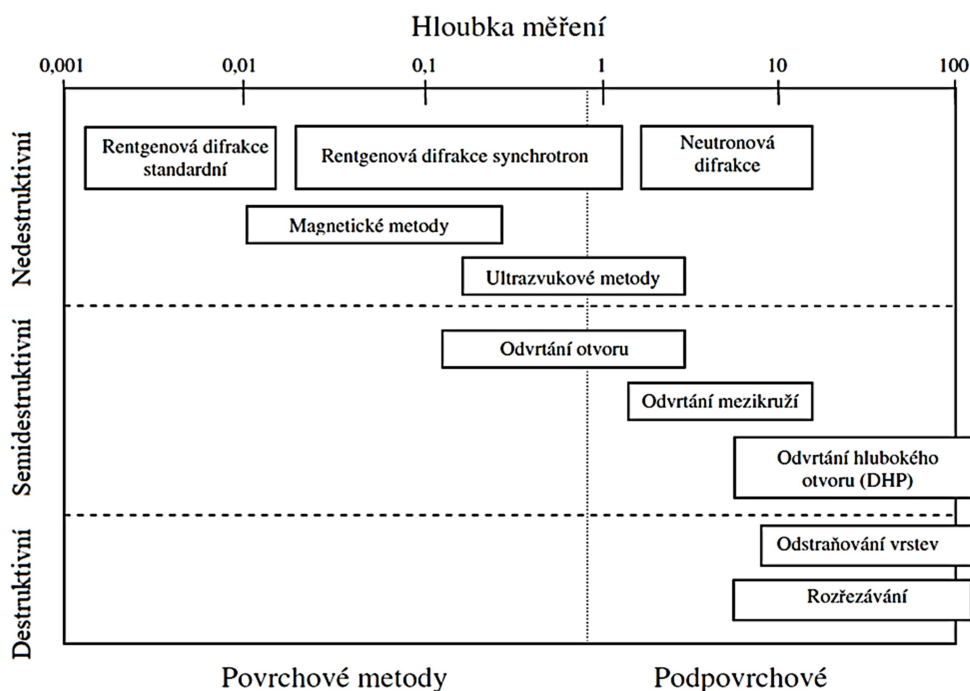
Obr. 13: Speciální ozařovací hlava pro použití na vnitřní průměr BMI trysky [13]

4 Ověřování vlivu LSP na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu

Hlavním účinkem metody LSP na materiál, resp. jeho povrch a povrchové vrstvy je iniciace zbytkového napětí. Proto o vlivu této technologie na materiál nejvíce vypovídá měření zbytkových napětí. Metod pro měření zbytkových napětí je několik, všechny jsou velmi složité a každá má nějaké úskalí.

4.1 Měření zbytkových napětí

Metod pro měření zbytkových napětí existuje celá řada. Obecně je lze rozdělit do tří základních skupin – nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní, jejich přehled je zobrazen na Obr. 14. Nedestruktivní metody jsou založeny na závislosti mezi fyzikálními vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím. Destruktivní metody využívají měření deformace související se změnou napětového stavu, který je vyvolán úběrem materiálu. [10]



Obr. 14: Přehled metod pro měření zbytkových napětí [10]

4.2 XRD metoda

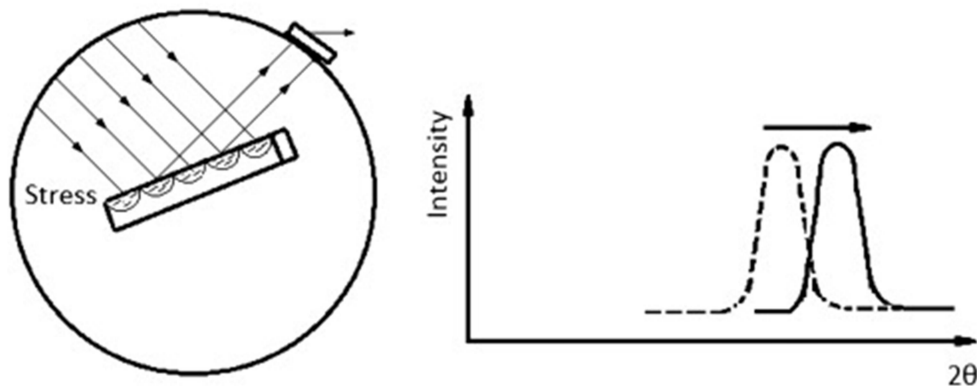
XRD měří deformaci určením posunů difrakčních špiček, které jsou vyvolány vnějším namáháním, nebo zbytkovým napětím. Naměřené deformace jsou s využitím Hookova zákona převedeny na napětí. Měřitelný objem závisí na hloubce proniknutí rentgenového paprsku. Hloubka pronikání rentgenového paprsku je závislá na koeficientu absorpce materiálu pro daný typ záření. [5]

Kvůli omezené hloubce průniku rentgenových paprsků je metoda XRD využívána pro měření zbytkového napětí v povrchu. Pokud chceme měřit více do hloubky, musí se povrch vždy do dané hloubky odleštit, což ale může jinak velice přesné výsledky měření mírně ovlivnit. [5]

K měření deformací v materiálu z XRD se využívá Braggova zákona,

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

kde λ je vlnová délka, 2θ je difrakční úhel a d je vzdálenost mřížkových rovin materiálu. Výběr difrakční špičky výrazně ovlivňuje přesnost měření. Větší difrakční úhel 2θ přináší vyšší citlivost měření a tím pádem vyšší přesnost naměřených deformací a tím pádem i vypočteného zbytkového napětí. Proto je důležité volit co největší difrakční úhel je možné. Jakákoliv změna vzdálenosti krystalových rovin vede ke změně difrakčního úhlu. Vzorek se během analýzy otáčí okolo normály o úhel ψ . Když je úhel $\psi=0$ je vzdálenost atomových rovin d_0 . Když je vzorek otočen okolo normály o úhel ψ je meziatomová vzdálenost d_ψ . Když se vlivem vnitřního napětí změní meziatomová vzdálenost d , změní se difrakční úhel otočením vzorku o úhel ψ . Měření deformace (parametru d) XRD metodou je základní princip. V praxi je vyžadován difrakční úhel vyšší než 120° . Pokud je v povrchu tlak, vzdálenost d se zmenší a úhel difrakce se zvýší v důsledku náklonu. [5]



Obr. 15: Difrakce z rovin (které splňují Braggův zákon). Difrakční špička vzniká při vyšších hodnotách 2θ [5]

4.3 Magnetické metody

Tyto metody využívají odezvu materiálu na působení střídavého magnetického pole. Mezi magnetické metody patří magnetoelastická a magnetostrikční metoda. [10]

U magnetoelastické metody se využívá detekce Barkhausenova šumu. Barkhausennův šum nevypovídá jen o vnitřním napětí, ale také o mikrostruktuře a tvrdosti. [10]

Magnetostrikční metoda využívá změny magnetické indukce. Tyto změny zachycuje detekční cívka. [10]

4.4 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody využívají závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln materiálem a elastickými koeficienty materiálu. Využívají se příčně nebo podélně polarizované vlny. Rozdíl hlavních napětí je možno měřit příčně polarizovanými vlnami s využitím akusticko-elastického dvojlomu, měření probíhá ve dvou na sobě kolmých rovinách. Lze měřit

současně podélnými i příčnými vlnami, potom lze eliminovat některé vstupní hodnoty výpočtu, protože vlny se šíří různou rychlostí. [10]

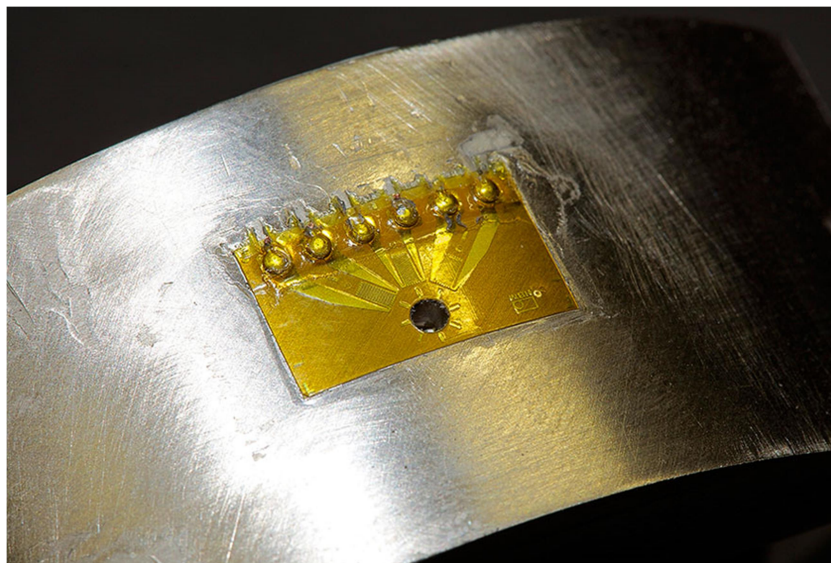
4.5 Odvrtávací metoda

Patří mezi nejpoužívanější metody pro měření zbytkových napětí. Někdy bývá označována jako metoda otvoru. [11]

Principem metody je vyvrtání otvoru do povrchu materiálu, tím dojde k uvolnění zbytkových napětí, které vyvolá deformaci v okolí otvoru. Deformace jsou měřeny ve třech na sobě nezávislých osách. Zbytkové napětí se vyhodnocuje pomocí tzv. kalibračních koeficientů. Otvor může být zhotoven pomocí konvenčních ale i nekonvenčních metod. Používá se vrtání čelní válcovou frézou viz. Obr. 16, nebo speciálně tvarovanou frézou, otvor může být zhotoven taky abrazivní tryskou, laserovým paprskem, nebo elektrojiskrově. Nejvhodnější metodou pro zhotovení otvoru je vysokorychlostní vrtání, u kterého dochází k nejmenšímu ovlivnění materiálu. Měření deformace se provádí nejčastěji tenzometrickými růžicemi, existují také optické metody pro bezkontaktní měření. [11]



Obr. 16: Nástroj pro zhotovení otvoru u odvrtávací metody [12]



Obr. 17: Tenzometrická růžice s odvrtaným otvorem [12]

Metoda je použitelná pro měření dvouosé napjatosti od cca 30 μm do cca 2 mm hloubky pod povrchem, přesná hloubka závisí na průměru vrtaného otvoru. Hloubka může být i větší, pak ovšem klesá rozlišení blíže k povrchu. Analyzovat lze oblast od 1 mm^2 . Mezi výhody této metody patří rychlost, jednoduchost a mobilita měřícího zařízení. Mezi hlavní nevýhody patří poškození povrchu součásti otvorem. Další nevýhodou je snížená přesnost a rozlišení při měření materiálu s nehomogenními vlastnostmi, nebo při nerovnoměrných napětí. [11]

Převod mezi naměřenými deformacemi a zbytkovým napětím v materiálu zajišťují kalibrační koeficienty. Teoreticky odvozené kalibrační koeficienty uvažují průchozí otvor, homogenní, izotropní a dokonale elastický materiál, navíc jsou závislé pouze na vlastnostech materiálu, průměru otvoru a vzdálenosti od otvoru. V praxi však tyto aspekty nejsou splněny, proto se teoreticky odvozené koeficienty nepoužívají. Kalibrační koeficienty se stanovují experimentální kalibrací, nebo numerickým výpočtem metodou konečných nebo hraničních prvků. Takto stanovené koeficienty vyjadřují vztah mezi zbytkovým napětím v materiálu a naměřenými deformacemi v závislosti na reálných rozměrech otvoru, včetně hloubky, tvaru tenzometrické růžice, materiálu atd. Úpravou kalibračních koeficientů lze ve výpočtu zohlednit anizotropii a nehomogenitu materiálu. [11]

Základním způsobem vyhodnocení naměřených vnitřních napětí je metoda ekvivalentních homogenních napětí. Obecně nehomogenní napětí se nahrazuje odpovídajícím homogenním napětím. Kalibračními koeficienty jsou vektory, jejichž hodnoty odpovídají určité hloubce otvoru a výsledné napětí je chápáno jako vážený průměr ze všech kroků do dané hloubky. Koeficienty se řídí normou ASTM E837 v závislosti na rozměrech otvoru a typu tenzometrické růžice. Tato metoda je vhodná pro vyhodnocení výsledků, kde se naměřené deformace v závislosti na hloubce výrazně nemění. [11]

Dalším způsobem vyhodnocení naměřených dat je integrální metoda. Tato metoda předpokládá, že deformace na povrchu je kumulativní funkcí zbytkového napětí v určité hloubce a

hloubky otvoru. Uvažuje vliv vnitřního napětí, který se mění s hloubkou otvoru, v určitém místě. Kalibrační koeficienty jsou 2D funkcí hloubky otvoru a uvažované hloubky působení uvolněného napětí a jsou vyjádřeny jako trojúhelníkové matice. Do výpočtu vstupuje vektor deformací v různých hloubkách, vznikne soustava rovnic a jejímž výsledkem je vektor zbytkových napětí v daných hloubkách. Zkreslení dat při použití této metody je minimální. Metoda obsahuje velké množství výpočtů a kroků, proto je z časového hlediska velmi náročná a navíc je potřeba velká výpočetní kapacita a programové vybavení. Metoda je navíc velmi náchylná na chyby měření. Integrální metoda je přes své nevýhody jednou z nejlepších, které lze použít. [11]

Mezi jednodušší metody patří metoda průměrného napětí, která vychází z metody ekvivalentních homogenních napětí. Výpočet probíhá v několika krocích, zbytkové napětí je průměrnou hodnotou napětí před a po odvrtní přírůstku otvoru. Předpokládá se, že ekvivalentní homogenní napětí je rovno průměrné hodnotě napětí v závislosti na hloubce otvoru. [11] Obdobná je metoda přírůstku deformace, která také vychází z myšlenky, že změna deformace je způsobena uvolněným napětím na daném přírůstku otvoru a zanedbává změny deformace na již odvrtných částech otvoru, v závislosti na celkové hloubce. Dvě poslední metody jsou vhodné spíše pro měření rovnoměrných napětí a velikost jejich chyby je přímo úměrná hloubce. [11]

Jednoduššími ekvivalenty integrální metody jsou spline metoda a metoda mocninných řad. Druhá jmenovaná zahrnuje hloubku působení zbytkového napětí od povrchu a celkovou hloubku otvoru. Výsledný průběh napětí je aproximován pomocí polynomu nízkého stupně. Oproti integrální metodě je toto řešení výpočtu stabilní, nicméně metoda nedokáže postihnout výrazně se měnící napětí. Spline metoda nahrazuje výsledné zbytkové napětí spojitou spline funkcí, což je výhodnější než diskrétní hodnoty generované integrální metodou. Tato metoda je také stabilní a málo citlivá na chyby měření. Oproti metodě mocninných řad lépe popisuje skutečný stav. Nevýhodou spline metody je matematická složitost. [11]

Další používanou metodou je přímý výpočet pomocí metody konečných prvků, ten se však používá ve speciálních případech. [11]

4.6 Porovnání XRD a odvrťovací metody pro měření po LSP

Porovnání těchto dvou metod bylo prováděno na třech různých materiálech, na které byla použita technologie laser shock peening. Jednalo se o materiály ocel E355, X45NiCrMo16 a hliníková slitina EN AW 7075. [5]

U slitiny 7075 bylo měření metodou XRD ovlivněno hrubými zrny materiálu, v blízkosti povrchu, kde je jemnozrnná struktura byly výsledky přijatelné. Výsledky naměřené metodou otvoru byly o 5% vyšší než u metody XRD. U materiálu E355 a X45NiCrMo16 byl trend průběhu napětí naměřený oběma metodami srovnatelný, nicméně hodnoty zbytkového napětí naměřené metodou otvoru byly vyšší. U materiálu E355 to bylo o 15%, u materiálu X45NiCrMo16 až o 35%. [5]

5 Ekonomické hodnocení technologie LSP

Při hodnocení ekonomické náročnosti je počítáno s reálně používanými parametry technologie. Cena pulsního laseru s parametry 10 J, 20 Hz a 10 ns od firmy LSP-Technologies je v současné době určena na 1,2 mil. Euro. Celková cena technologie, včetně chlazení tekutým dusíkem a polohovacího robotického ramena, které slouží k polohování ošetřované součásti, se pak pohybuje okolo 38 mil. Kč.[20] V současné době je trend snižovat energii laserových zařízení pro LSP (např. na 3 J). Úměrně tomu klesá pořizovací cena zařízení.

Mezi fixní náklady na provoz patří náklady na prostory, údržbu a pojištění. Náklady na prostor se samozřejmě pro různá pracoviště liší, v případě centra HiLASE v Dolních Břežanech je to 500 tis. Kč za rok. Náklady na opravy zařízení jsou pak vyčísleny na 250 tis. Kč za rok. Pojištění zařízení vychází na 1,5 % ceny zařízení, čili 570 tis. Kč. V součtu tedy roční fixní náklady na provoz zařízení vychází na 1 320 000 Kč. [20]

Experimentální část

Experimentální část práce je vypracována v rámci projektu SUSEN ve spolupráci s centrem výzkumu Řež s.r.o. v Plzni. Experiment slouží k ověření vlivu technologie LSP na vybrané materiály používané v energetice. Cílem je ověřit informace nabyté v teoretické části práce, jako například vliv technologie na zbytková napětí, mikrostrukturní změny, změny v jakosti povrchu a další.

Konkrétně se jedná o materiály 08CH18N10T a 14CH17N2, tyto materiály budou blíže popsány v následujících kapitolách. Na každý z materiálů byla aplikována technologie LSP v jedné, dvou a třech vrstvách. Vrstvou se rozumí počet opakování procesu LSP na jedné a té samé ploše materiálu.

Stěžejním bodem experimentu je měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakční metody. Toto měření má porovnat velikosti a průběhy zbytkových napětí při použití různého počtu vrstev LSP. Primární pozornost je kladena zejména průběhům zbytkových napětí. Konkrétní hodnoty zbytkových napětí jsou důležité, ale je nutné brát je s jistou rezervou. S rezervou vzhledem ke směrodatným odchylkám některých konkrétních výsledků a také k průběhu procesu přípravy materiálů před měřením, kdy dochází k elektrolytickému odlešťování požadované vrstvy povrchu, což může v materiálu způsobit jisté změny, například uvolnění části napětí.

Dalším bodem je měření mikrotvrdosti. Je zjišťován průběh mikrotvrdosti od povrchu, na kterém byla aplikována technologie LSP do hloubky materiálu. Toto měření také sloužilo pro předběžné určení hloubky, do které technologie LSP ovlivňuje materiál. Z takto určené hloubky se dále vycházelo při stanovení celkové hloubky měření zbytkových napětí. Zkoumání korelace mezi průběhem zbytkového napětí a průběhem mikrotvrdosti je také jedním z bodů této práce.

Zajímavou informací zjištěnou při zpracovávání rešerše bylo, že technologie LSP zlepšuje jakost povrchu (Ra) oproti výchozímu, zpravidla broušenému, stavu. Vzhledem k tomu, že technologie LSP zanechává na povrchu materiálu, většinou viditelný, reliéf může tato informace působit rozporuplně. Z tohoto důvodu je do experimentu zařazeno také měření jakosti povrchu pomocí optického profiloměru.

Posledním bodem experimentu je metalografické hodnocení mikrostruktury pomocí světelného mikroskopu. Cílem tohoto bodu je ověření mikrostrukturních změn v materiálu, kdy má docházet ke zjemňování zrna směrem k ošetřenému povrchu, a přímo pod povrchem má být jemná struktura.

6 Experimentální materiály

V experimentu jsou zkoumány vlivy technologie LSP na ocelové materiály v jakostech 08CH18N10T a 14CH17N2 dle GOST. Tyto materiály jsou používány mimo jiné také v jaderné energetice.

6.1 Materiál 08CH18N10T

Jedná se o chrom-niklovou austenitickou stabilizovanou žáruvzdornou ocel. Dalším důležitým legujícím prvkem je titan. Chemické složení je uvedeno v Tab. 1. Tato ocel dosahuje pevnosti v tahu až 700 MPa. Minimální mez kluzu $R_{p0,2}$ je 200 MPa. Minimální tažnost A_{80} je 40%. Tato ocel je nemagnetická a nelze jí kalit. Má sklon ke zpevňování za studena při tváření nebo obrábění nevhodnými parametry. Ke zpevnění dochází transformací austenitu na deformační martenzit. Při zpevnění dochází ke zvýšení meze pevnosti a snížení tažnosti, materiál se také může stát feromagnetickým. [17]

Tab. 1: Chemické složení (%) materiálu 08CH18N10T [16]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Co
0-0,08	1-2	0-0,8	0-0,035	0-0,02	17-19	9-11	0-0,3	0-0,3	0-0,7	0-0,05

Ocel 08CH18N10T je odolná proti korozi v průmyslových atmosférách, alkáliích a slabších kyselinách včetně dusičné. Díky přítomnosti titanu nevznikají karbidy chromu, a proto je ocel odolná proti mezikystalové korozi až do teploty 650°C. [17]

Ocel je svařitelná, má dobrou obrobiteľnosť a dá sa leštit. [17]

Používá se v chemickém a potravinářském průmyslu a v energetice. Často se z ní vyrábějí zásobníky, nádoby a jímky. [17]

6.2 Materiál 14CH17N2

Jedná se o chrom-niklovou martenzitickou korozivzdornou ocel. [19] Chemické složení je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2: Chemické složení (%) materiálu 14CH19N2 [18]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Co	V	W
0,14	0,40	0,39	0,018	0,001	16,18	1,57	0,08	0,18	0,004	0,023	0,035	0,045

Tato ocel dosahuje v zušlechtěném stavu meze pevnosti v tahu až 1050 MPa (v žíhaném stavu max. 950 MPa pro za studena tažené výrobky) a meze kluzu $R_{p0,2}$ až 700 MPa. Minimální tažnost v zušlechtěném stavu A_{80} je 10%. [19]

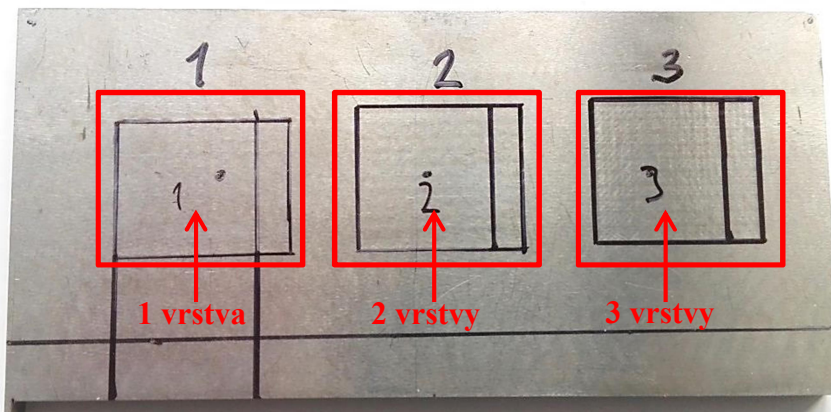
Zušlechtěná odolává atmosférické korozi i v mořské atmosféře, odpadním vodám bez nebo s nízkým obsahem iontů chloru, vodní páře, zředěným organickým kyselinám a kyselině dusičné za normálních teplot. [19]

Obrobiteľnosť závisí na tvrdosti po tepelném zpracování, nicméně lze jí bez obtíží obrábět i ve stavu zušlechtěném na nižší hodnoty pevnosti. Je svařitelná. Pro pevnostní svary je nutný předehřev a pomalé ochlazování svaru, případně žíhání. [19]

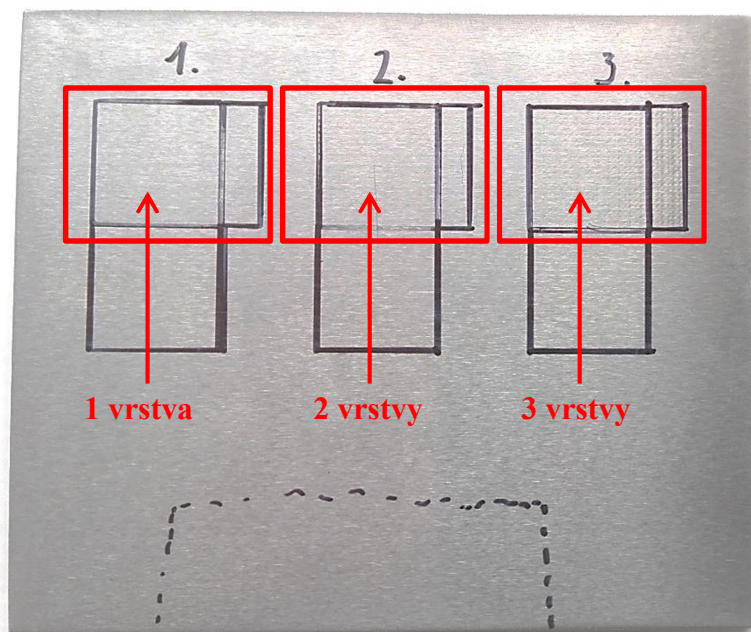
Používá se pro mechanicky více namáhané strojní součásti, např. ventily, pumpy, hřídele, oběžná kola kompresorů a také spojovací materiál. Vyrábí se z ní také formy pro lisované sklo. Obecně se používá v leteckém a petrolejářském průmyslu a energetice. [19]

7 Vzorky

Vzorky byly dodány ve formě dvou plechů/destiček o rozměrech 120 x 100 mm a jmenovité tloušťce 5 mm, jeden z materiálu 08CH18N10T a druhý z materiálu 14CH17N2. Povrchy obou plechů byly před použitím technologie LSP broušeny. Na obou destičkách byla použita technologie LSP, kterou byla ošetřena třikrát plocha o rozměrech 20 x 25 mm a to v jedné, dvou a třech vrstvách. Tzn. na destičce jsou tři obdélníkové oblasti o rozměrech 20 x 25 mm, na které byla aplikována technologie LSP a to buď jednou, dvakrát, nebo třikrát. Tyto destičky jsou i s vyznačenými oblastmi zachyceny na Obr. 18 a Obr. 19.



Obr. 18: Destička z materiálu 08CH18N10T s vyznačenými oblastmi ošetřeny technologií LSP



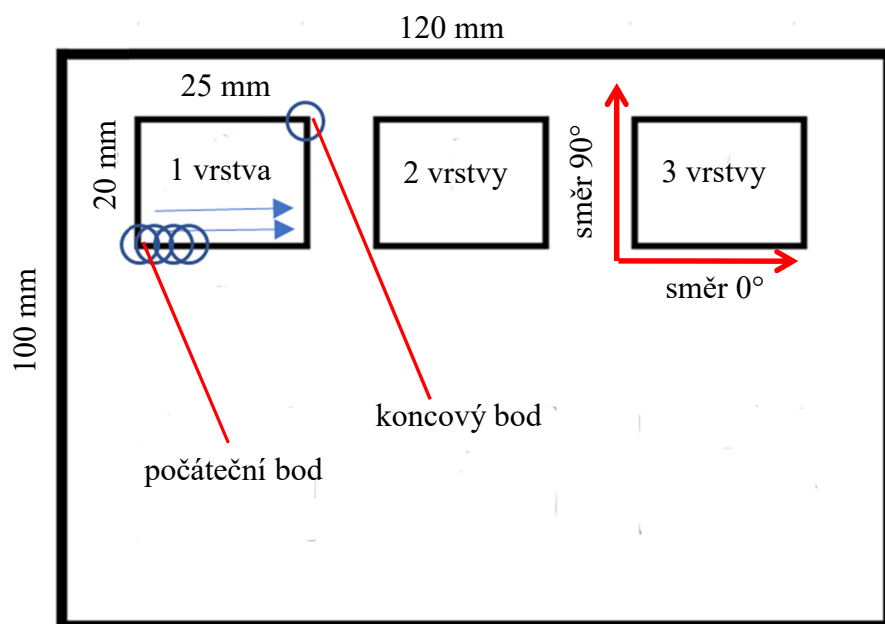
Obr. 19: Destička z materiálu 14CH17N2 s vyznačenými oblastmi ošetřeny technologií LSP

Následující tabulka (Tab. 3) shrnuje parametry nastavení LSP zařízení při výrobě vzorků.

Tab. 3: Parametry laserového zařízení při výrobě vzorků

Energie pulzu [J]	Průměr paprsku na povrchu materiálu [mm]	Hustota zářivého toku [GW/cm ²]	Nepropustná vrstva	Plošná hustota pulzů [1/cm ²]	Překrytí pulzů v řadě [%]	Překrytí řad [%]	Doba pulzu [ns]
3	2	3,2	Vinylová páska	64	52,8	77,8	30

Ostřelování povrchu pulzním laserem probíhalo v řadách zleva doprava, počáteční řada byla na spodním okraji viz. Obr. 20. Průměr kruhového paprsku v místě dopadu na povrch materiálu neboli tzv. spot size byl 2 mm, každý následující spot v řadě překrývá ten předchozí o zhruba 53 %. Jednotlivé řady se pak překrývají o cca 78 %.



Obr. 20: Schéma přípravy vzorků

Z těchto destiček byly na metalografické pile nařezány vzorky pro měření zbytkového napětí o rozměrech 20 x 20 mm a vzorky pro měření mikrotvrdomosti a metalografii o rozměrech 20 x 5 mm, které byly dále rozděleny na dva vzorky o rozměrech 10 x 5 mm pro zhotovení podélného a příčného výbrusu. Na Obr. 18 a Obr. 19 jsou vidět vyznačené oblasti 20 x 20 mm a 20 x 5 mm. Kromě oblastí ošetřených LSP byly u obou materiálů vyřezány také vzorky materiálu neošetřeného technologií LSP, tedy s pouze broušeným povrchem. Tyto vzorky byly vyřezány stejným způsobem a mají i totožné rozměry.

Vzorky určené ke zhotovení výbrusů byly zalisovány do pryskyřice. U takto preparovaných vzorků byla vyznačena hrana povrchu, na který byla aplikována technologie LSP pomocí měděných kroužků, které byli zalisovány společně s vlastním vzorkem, jak je vidět na Obr.

21. V případě vzorků, které byly pouze broušené, byla označena hrana totožná s povrchem, na který bylo aplikováno LSP.



Obr. 21: Metalografický výbrus příčného řezu

Všechny připravené vzorky byly označeny. Pro přehlednost byl zvolen formát označování vzorků v následujícím tvaru XXXX-X-XX. První čtyři znaky charakterizují materiál a shodují se s prvními čtyřmi znaky označení materiálu dle GOST. Další číslice udává počet vrstev LSP, pro pouze broušený vzorek byla použita číslice 0. Poslední číslo/dvojčíslí udává orientaci řezu vzhledem ke směru, ve kterém probíhalo ostřelování povrchu pulzním laserem, čili směr 0° popisuje podélný směr shodný se směrem pohybu (stopy) laseru v řadě a směr 90° směr kolmý na tento pohyb. Pro názornost byly tyto směry schematicky vyznačeny na Obr. 20. Následující tabulka (Tab. 4) obsahuje přehled vzorků.

Tab. 4: Přehled vzorků

		Materiál			
		08CH18N10T		14CH17N2	
		Směr			
		0°	90°	0°	90°
Počet vrstev	08CH-0- 0°	08CH-0- 90°	14CH-0- 0°	14CH-0- 90°	
	08CH-1- 0°	08CH-1- 90°	14CH-1- 0°	14CH-1- 90°	
	08CH-2- 0°	08CH-2- 90°	14CH-2- 0°	14CH-2- 90°	
	08CH-3- 0°	08CH-3- 90°	14CH-3- 0°	14CH-3- 90°	

8 Měření zbytkových napětí

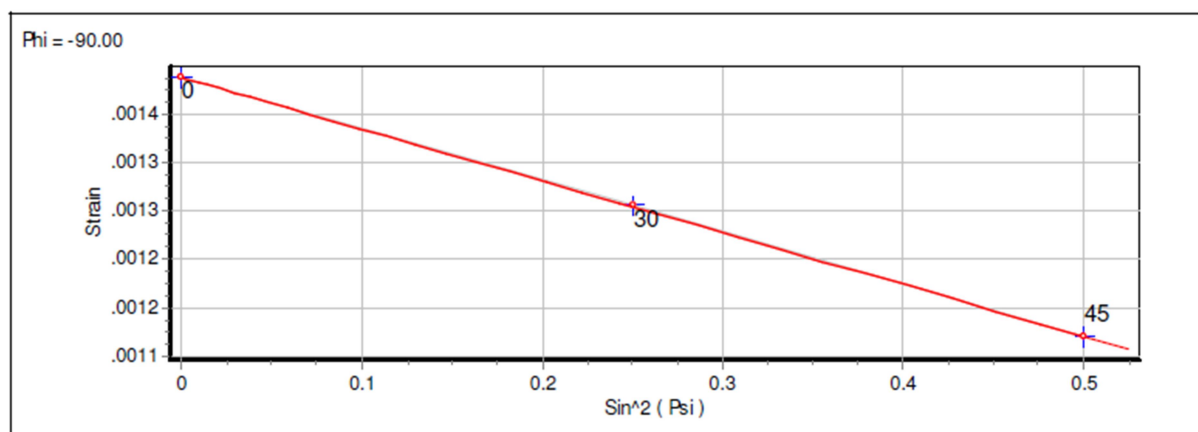
Technologie LSP je primárně využívána, protože v povrchu a podpovrchové vrstvě materiálu vytváří tlakové reziduální napětí. Tlakové zbytkové napětí má příznivý vliv na mechanické vlastnosti materiálu, především na mez únavy a také zamezuje iniciaci trhlin. Teorie vzniku zbytkových napětí a vlivy technologie LSP na materiál byly popsány v teoretické části této práce.

Způsobů měření zbytkových napětí existuje několik. Pro měření zbytkových napětí v tomto experimentálním programu byla vybrána metoda rentgenové tenzometrie.

8.1 Metoda $\sin^2\psi$

Podstatou rentgenové difrakční metody měření makroskopických napětí v polykrystalických materiálech je aplikace Braggovy rovnice a Hookova zákona na kvaziizotropní tuhá tělesa. [21]

Základem metody je stanovení změn vzdálenosti atomových mřížkových rovin (hkl), které jsou vyvolány napětím. Měřená deformace má směr normály měřené roviny (hkl) krystalů na kterou dopadají rentgenové paprsky. Pokud primární svazek P (vlnová délka $\lambda = \text{konst.}$, intenzita I_0) dopadá na povrch nenapjatého tělesa a nachází-li se v ozářené oblasti dostatečný počet různě orientovaných krystalů, vzniká Debyeův-Scherrerův difrakční kužel, který je symetricky vzhledem ke směru P. Normály rovin hkl, těchto různě orientovaných krystalů, tvoří tzv. normálový kužel, který je taktéž symetrický směru P. Pokud v ozářené oblasti působí konstantní napětí, jsou difrakční i normálový kužel vůči směru P asymetrické. Detektor je umístěn kolmo ke směru primárního svazku P a difrakční kužel na něm tvoří tzv. difrakční kroužek. Z tohoto kroužku jsou zjišťovány intenzity I difraktovaného paprsku z konkrétně orientovaných krystalů. Takto získáme závislost intenzity I na reflexním Braggově úhlu θ , čili difrakční profil. Dále vyjádříme tenzory deformace ε a napětí σ . Tensor deformace je ztotožněn s naměřenými deformacemi, tím dostaneme rovnici pro měření dvojosé napjatosti. Závislost ε i θ na $\sin^2\psi$ (ψ je úhel mezi normálou povrchu materiálu a normálou reflektující roviny hkl) je pro každý azimutální úhel φ lineární, tato závislost je vidět na Obr. 22. Pokud v povrchové vrstvě působí konstantní dvojosá napjatost, potom lze složku napětí σ_φ a součet hlavních napětí σ_1 a σ_2 určit ze závislosti $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$, nebo $\theta_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$. K sestavení těchto lineárních závislostí je potřeba naměřit hodnoty $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ a $\theta_{\varphi,\psi}$ alespoň pro dva různé úhly ψ . [21]



Obr. 22: Lineární závislost ε na $\sin^2\psi$ z měření vzorku 14CH-1-90° v hloubce 1 mm

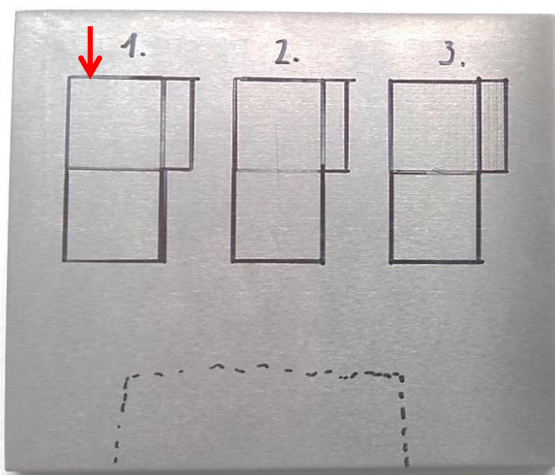
Korektnost výsledků metody $\sin^2\psi$ je podmíněna několika aspekty, mezi které patří konstantní homogenní dvojosý stav napjatosti, hlavní osy elipsoidu napětí mají směr rovnoběžný s povrchem vzorku, kvaziizotropie (náhodné rozdělení orientací krystalů) a homogenita materiálu (nemusí být bezvýhradně dodržena). [21]

Na polohu linií mohou kromě makroskopických napětí i napětí mikroskopická. Protože tato mikronapětí nejsou lineární funkcí $\sin^2\psi$, lze jejich účinek na výpočet eliminovat určením

směrnice závislosti $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ alespoň ze 4 hodnot $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ nebo $\theta_{\varphi,\psi}$ v různých směrech ψ . Směrnice $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ nebo $\theta_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ a úsek $\varepsilon_{\varphi,\psi=0}$ nebo $\theta_{\varphi,\psi=0}$ k výpočtu σ_{φ} a $\sigma_1 + \sigma_2$ se určí metodou nejmenších čtverců. Napětí σ_{φ} lze touto metodou získat i bez znalosti mezi rovinné vzdálenosti nebo Broggova úhlu pro nezátížený stav materiálu. [21]

8.2 Příprava vzorků

Měření probíhalo na celkem osmi vzorcích. Čtyři vzorky z materiálu 08CH18N10T a čtyři z 14CH17N2. Příprava všech vzorků pro měření zbytkových napětí probíhala stejným způsobem. Každý vzorek byl po vyříznutí označen z čela příslušným označením, viz kapitola 7. Místo označení vzorku je plocha řezu označeného červenou šipkou v Obr. 23. U všech vzorků bylo označení vygravírováno na totožné místo.



Obr. 23: Místo označení vzorku

Toto označení dále sloužilo pro orientaci při vyznačení místa měření zbytkového napětí. Místem měření zbytkového napětí byl zvolen bod uprostřed vzorku, čili 10 mm od okrajů vzorku. Bod byl vždy měřen od stejných hran, viz Obr. 24



Obr. 24: Místo měření zbytkového napětí na leštěném vzorku

První měření probíhalo přímo na povrchu, před každým následujícím měřením byl povrch vzorku elektrolyticky odleštěn o požadovanou tloušťku. V oblasti pod povrchem byl zvolen jemnější krok odebírání materiálu, protože v této oblasti se předpokládá, že tlakové zbytkové napětí by mohlo nejprve narůstat a až poté začít klesat, celková hloubka odebraného materiálu se zvolila na základě měření mikrotvrdosti (kapitola 9), do hloubky, kde mikrotvrdost klesla na hodnotu tvrdosti materiálu v broušeném stavu a již dále neklesala. Krok odebírání materiálu byl volen s ohledem na omezený počet měření zbytkových napětí, kdy toto měření je časově a finančně poměrně náročné.

Elektrolytické leštění probíhalo na zařízení Struers LectroPol-5 (Obr. 25, Obr. 26, Obr. 27). Jako lešticí elektrolyt byl použit roztok kyseliny sírové a metanolu v poměru 1:7, čili 1 díl H_2SO_4 na 7 dílů CH_3OH . Parametry leštění shrnuje následující tabulka (Tab. 5).

Tab. 5: Parametry nastavované při elektrolytickém leštění

Leštěná plocha [cm ²]	El. napětí [V]	Teplota elektrolytu [°C]	Průtok elektrolytu [l]	Čas [s]
0,5	12-48	17	12-20	-

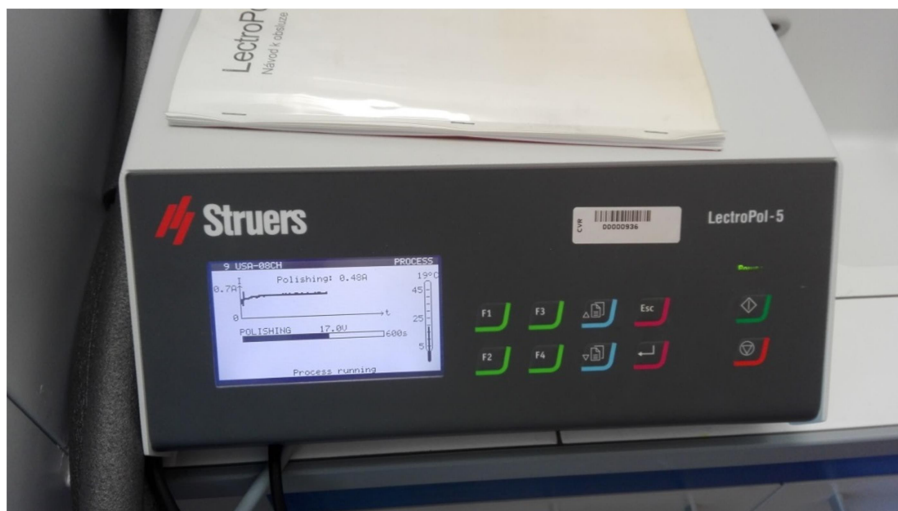
Leštěná plocha byla vymezena polymerovou maskou, která se nasazuje do zámků na lešticí zařízení a v jejím středu je kruhový otvor o ploše 0,5 cm². Elektrické napětí bylo upravováno dle hloubky odebíraného materiálu. Pro malé odebírané tloušťky v řádech setin milimetru bylo voleno nižší napětí (12-17 V), se zvyšující se odebíranou vrstvou se napětí úměrně zvyšovalo. Analogicky tomu bylo u průtoku elektrolytu. Teplota elektrolytu byla pomocí externího chlazení udržována na teplotě 17 °C. Čas byl volen v závislosti na odebírané vrstvě materiálu a ostatních parametrech leštění řadově od stovek až po tisíce sekund.



Obr. 25: Elektrolytické leštění Pomocí zařízení LectroPol



Obr. 26: Vzorek umístěný mezi elektrodou a plastovou maskou, pod kterou proudí elektrolyt



Obr. 27: Elektrolytické leštění pomocí zařízení LectroPol-5

Po každém procesu leštění byla mikrometrem změřena tloušťka materiálu v místě měření zbytkového napětí (viz Obr. 24). Pokud tato tloušťka odpovídala požadované hodnotě, postupoval vzorek na měření zbytkového napětí, pokud ne, byl proces leštění opakován do té doby, než bylo dosaženo požadované tloušťky.



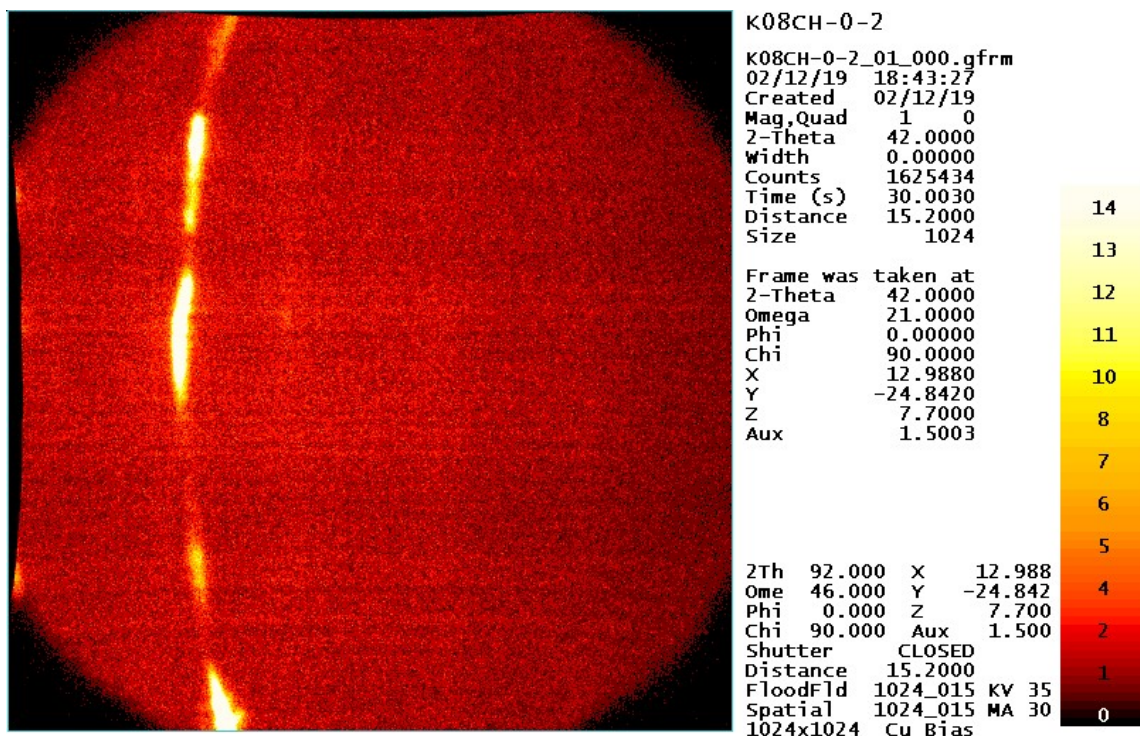
Obr. 28: Mikrometr pro měření hloubky úběru materiálu

8.3 Naměřené hodnoty

Měření zbytkových napětí na experimentálních materiálech mělo probíhat ve výzkumném centru NTC Západočeské univerzity v Plzni. Zde nakonec proběhlo pouze měření vzorků z materiálu 14CH17N2. Materiál 08CH18N10T vykazuje větší velikost zrna a pro takto hrubozrnný materiál nebyla v NTC k dispozici potřebná apertura pro rentgenový paprsek měřícího zařízení. Alternativou pro měření zbytkového napětí v materiálu 08CH18N10T se stalo laserové centrum HiLASE v Dolních Břežanech.

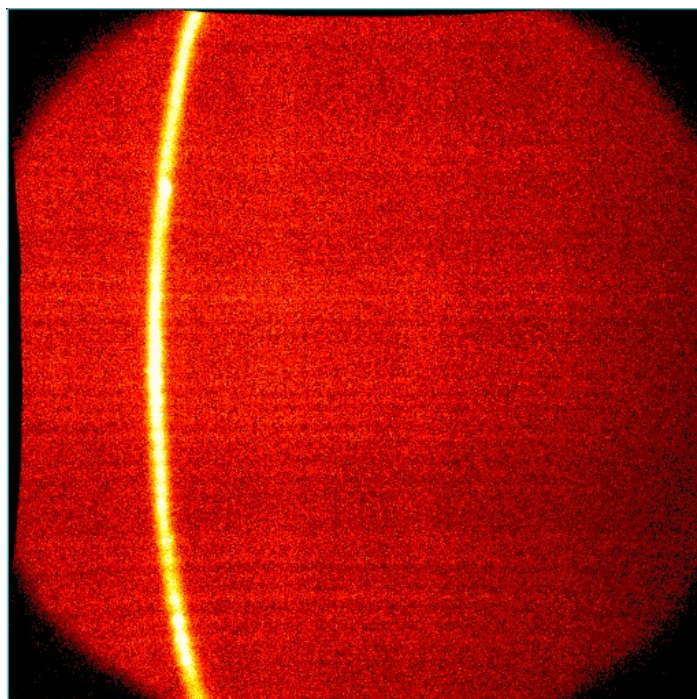
8.3.1 08CH18N10T

První pokus o měření zbytkového napětí u tohoto materiálu proběhl v centru NTC na zařízení Bruker D8, bohužel z již zmíněných důvodů nemohlo měření proběhnout. Na Obr. 29 jsou vidět nespojitosti difrakčního kroužku na detektoru, které značí nevhodnou konfiguraci měřicího zařízení pro daný materiál.



Obr. 29: Nespojitost difrakčního kroužku u vzorku 08CH-0-0°

Pro srovnání je na Obr. 30 zobrazen difrakční kroužek u vzorku z materiálu 14CH17N2.



Obr. 30: Difrakční kroužek u vzorku 14CH-0-0°

Měření zbytkového napětí v laserovém centru HiLASE také nepřineslo reprodukovatelné výsledky.

8.3.2 14CH17N2

Měření zbytkového napětí u materiálu 14CH17N2 probíhalo v centru NTC na zařízení Bruker D8. Tab. 6 shrnuje parametry měření.

Tab. 6: Parametry měření zbytkového napětí u materiálu 14CH17N2

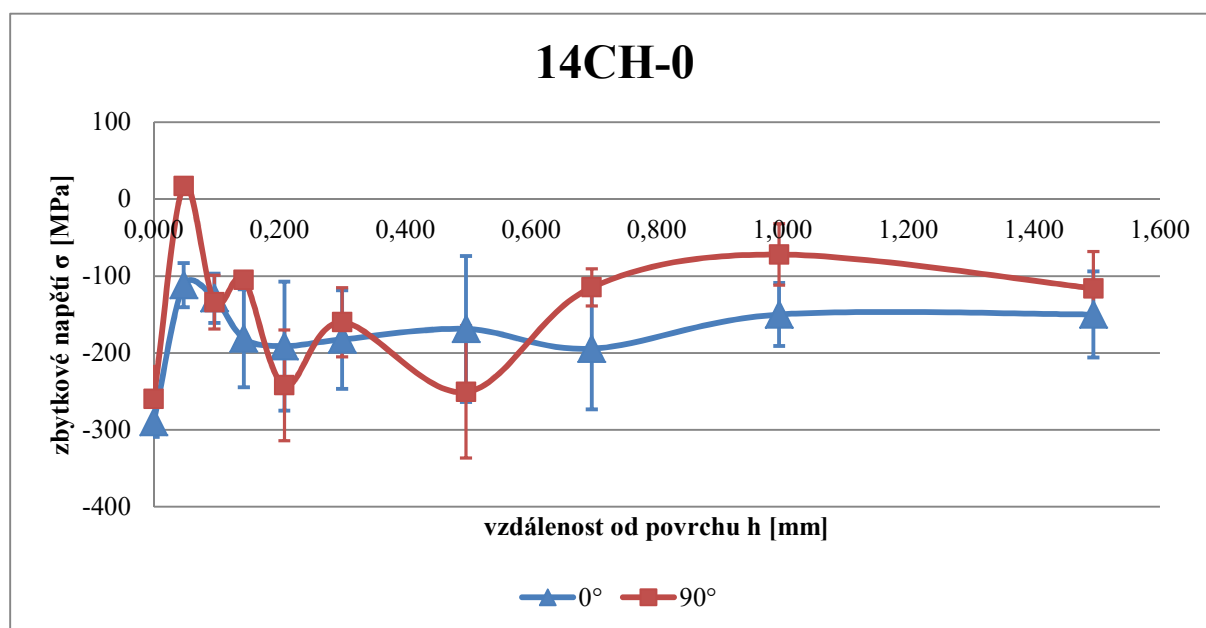
Měřená rovina hkl (špička)	Typ trubice	Apertura [mm]	2θ [°]	Poissonova konstanta	Youngův modul [MPa]	Doba expozice [s]	Napětí [kV]	Proud [mA]
(2,2,1)	Co	0,5	99,7	0,28	207000	30	35	30

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v následujících tabulkách (Tab. 7 až Tab. 10) a grafech (Graf 1 až Graf 4).

Tab. 7: Naměřené hodnoty zbytkového napětí vzorku 14CH-0 (ve druhém sloupci je vzdálenost od povrchu, v následujících sloupcích jsou hodnoty zbytkového napětí měřených ve směrech 0° a 90° včetně směrodatných odchylek)

14CH-0	h [mm]	$\sigma - 0^\circ$ [MPa]	±	$\sigma - 90^\circ$ [MPa]	±
povrch	0,000	-290	20	-260	43
1. leštění	0,048	-112	29	17	2
2. leštění	0,097	-129	32	-134	35
3. leštění	0,143	-181	64	-105	2
4. leštění	0,208	-191	84	-242	72
5. leštění	0,300	-183	64	-160	45
6. leštění	0,497	-169	95	-251	86
7. leštění	0,696	-194	79	-115	24
8. leštění	0,995	-150	41	-72	40
9. leštění	1,494	-150	56	-116	48

Graf 1: Průběh zbytkového napětí pod povrchem vzorku 14CH-0 ve směrech 0° a 90°

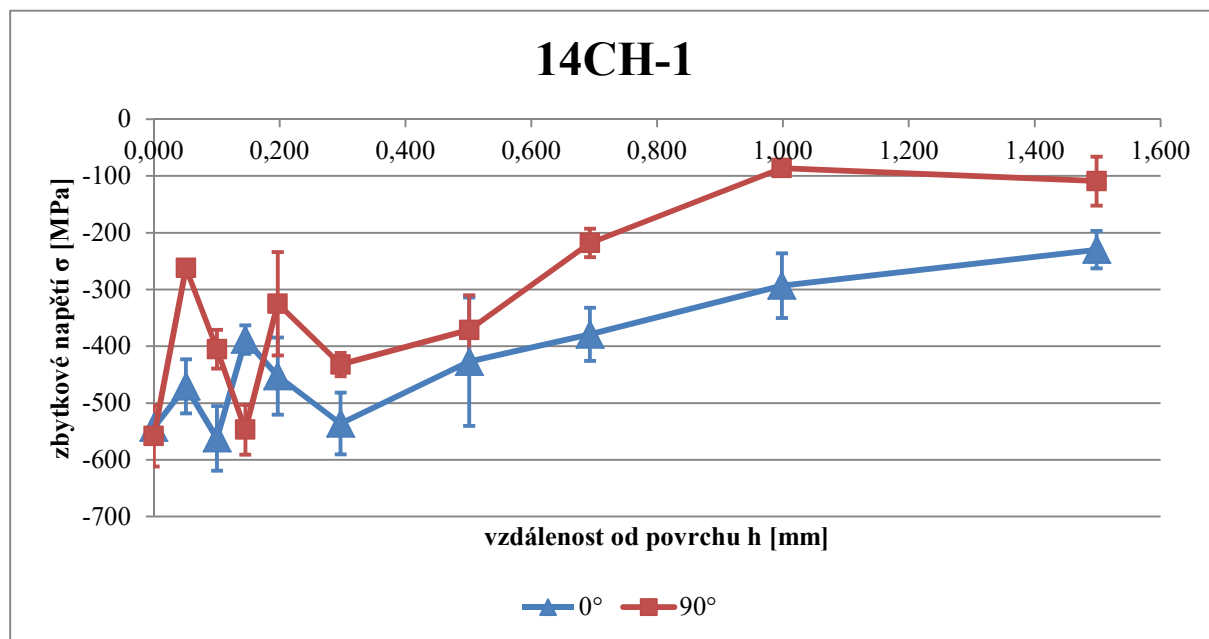


Z grafu (Graf 1) je patrné, že i u vzorku, na jehož povrch nebyla aplikována technologie LSP se v povrchu a pod ním nachází tlakové zbytkové napětí. Toto napětí je zde pravděpodobně vyvoláno broušením. Nejvyšších hodnot, které se pohybují mezi hodnotami 250 až 300 MPa, nabývá napětí na povrchu. Poté strmě klesá a následně opět mírně stoupá a ustaluje se na hodnotách mezi 150 až 200 MPa v případě směru 0° a 70 až 120 MPa v případě směru 90°.

Tab. 8: Naměřené hodnoty zbytkového napětí vzorku 14CH-1 (ve druhém sloupci je vzdálenost od povrchu, v následujících sloupcích jsou hodnoty zbytkového napětí měřených ve směrech 0° a 90° včetně směrodatných odchylek)

14CH-1	h [mm]	$\sigma - 0^\circ$ [MPa]	\pm	$\sigma - 90^\circ$ [MPa]	\pm
povrch	0,000	-543	19	-558	54
1. leštění	0,051	-471	48	-262	12
2. leštění	0,101	-562	57	-405	34
3. leštění	0,146	-388	25	-547	44
4. leštění	0,197	-453	68	-325	91
5. leštění	0,297	-536	54	-432	21
6. leštění	0,501	-427	113	-371	61
7. leštění	0,693	-379	47	-218	25
8. leštění	0,998	-293	57	-86	1
9. leštění	1,499	-230	33	-109	43

Graf 2: Průběh zbytkového napětí pod povrchem vzorku 14CH-1 ve směrech 0° a 90°

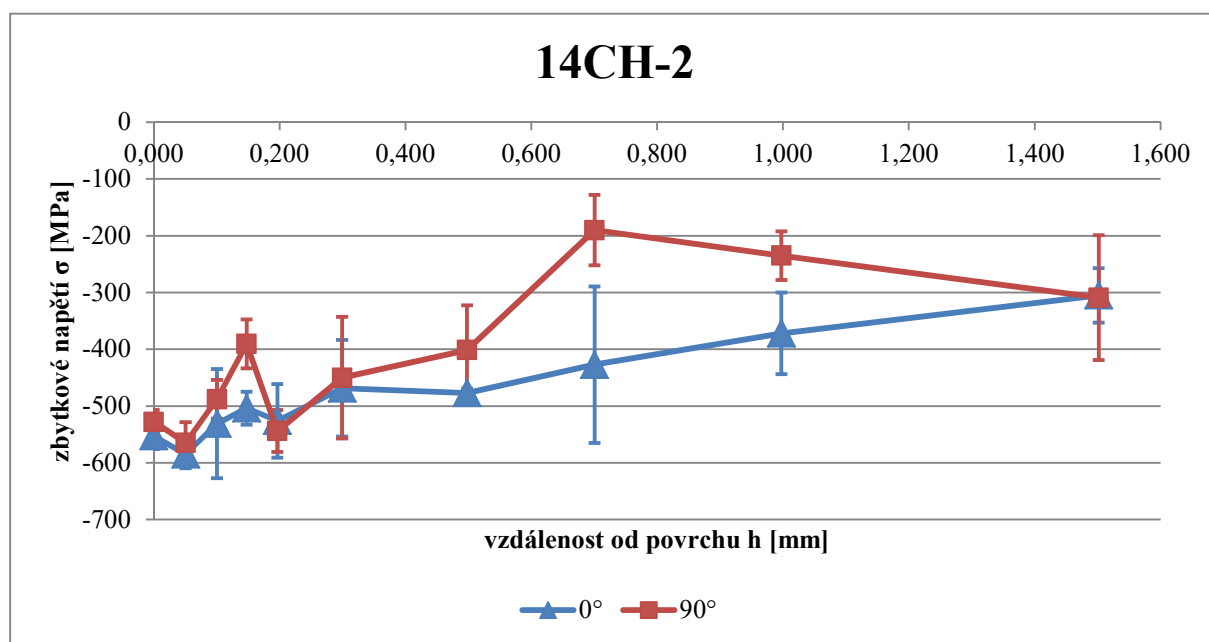


Průběh zbytkového napětí u vzorku 14CH-1 v grafu (Graf 2) je podobný jako u vzorku 14CH-0, pohybujeme se zde však ve vyšších hodnotách. Napětí na povrchu má hodnoty okolo 550 MPa v obou směrech. Do hloubky 0,2 mm napětí střídavě stoupá a klesá, poté pozvolna klesá. U směru 90° klesá napětí rychleji a od 1 mm se ustálí na hodnotách okolo 100 MPa.

Tab. 9: Naměřené hodnoty zbytkového napětí vzorku 14CH-2 (ve druhém sloupci je vzdálenost od povrchu, v následujících sloupcích jsou hodnoty zbytkového napětí měřených ve směrech 0° a 90° včetně směrodatných odchylek)

14CH-2	h [mm]	$\sigma - 0^\circ$ [MPa]	\pm	$\sigma - 90^\circ$ [MPa]	\pm
povrch	0,000	-553	23	-528	21
1. leštění	0,051	-585	25	-565	37
2. leštění	0,100	-531	96	-488	34
3. leštění	0,148	-504	29	-390	43
4. leštění	0,196	-526	65	-544	37
5. leštění	0,299	-469	85	-450	107
6. leštění	0,498	-477	8	-401	79
7. leštění	0,701	-427	138	-190	62
8. leštění	0,998	-372	72	-235	43
9. leštění	1,502	-305	48	-309	110

Graf 3: Průběh zbytkového napětí pod povrchem vzorku 14CH-2 ve směrech 0° a 90°

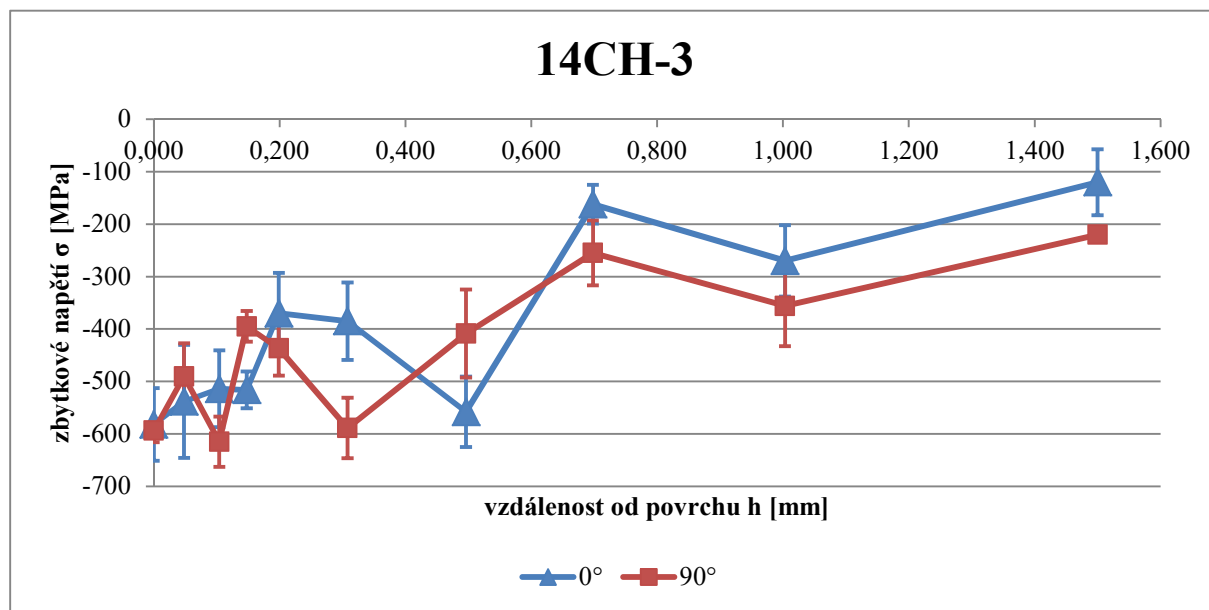


Napětí na povrchu vzorku 14CH-2, znázorněné v grafu (Graf 3) nabývá přibližně stejných hodnot jako u vzorku 14CH-1, čili zhruba 550 MPa. Následující průběh však nevykazuje takové výkyvy jako předchozí dva vzorky 14CH-0 resp. 14CH-1. Napětí klesá, stejně jako v předchozím případě, ve směru 90° rychleji a ustaluje se na hodnotách mezi 200 až 300 MPa. Ve směru 0° napětí klesá téměř lineárně.

Tab. 10: Naměřené hodnoty zbytkového napětí vzorku 14CH-3 (ve druhém sloupci je vzdálenost od povrchu, v následujících sloupcích jsou hodnoty zbytkového napětí měřených ve směrech 0° a 90° včetně směrodatných odchylek)

14CH-3	h [mm]	$\sigma - 0^\circ$ [MPa]	\pm	$\sigma - 90^\circ$ [MPa]	\pm
povrch	0,000	-582	69	-594	22
1. leštění	0,048	-538	108	-490	63
2. leštění	0,104	-514	73	-615	48
3. leštění	0,148	-516	35	-395	30
4. leštění	0,199	-370	77	-437	52
5. leštění	0,308	-385	74	-589	58
6. leštění	0,496	-558	67	-409	84
7. leštění	0,698	-162	37	-255	62
8. leštění	1,003	-270	68	-356	77
9. leštění	1,500	-120	63	-220	5

Graf 4: Průběh zbytkového napětí pod povrchem vzorku 14CH-3 ve směrech 0° a 90°



Nejvyšší zbytkové napětí na povrchu bylo naměřeno u vzorku se třemi vrstvami LSP 14CH-3 (Graf 4). Hodnoty se zde pohybují okolo 600 MPa. Výkyvy jsou zde opět menší než u vzorků 14CH-0 a 14CH-1, ovšem oproti vzorku 14CH-2 zde dochází k prudšímu poklesu napětí v hloubce 0,5 až 0,7 mm, jak je vidět v Graf 4, poté se napětí ustaluje.

9 Měření mikrotvrdosti

Cílem měření mikrotvrdosti bylo předběžně stanovit hloubku, do které je materiál technologií LSP ovlivněn, z této hloubky se následně vycházelo při určování hloubky měření zbytkových napětí. Dalším cílem bylo sledovat korelaci mezi průběhem mikrotvrdosti a zbytkového napětí pod povrchem materiálu.

Měření probíhalo na šestnácti vzorcích. Z obou materiálů byly zhotoveny čtyři podélné a čtyři příčné výbrusy, na kterých proběhlo měření. Vzorky byly označeny dle Tab. 4.

Mikrotvrdost byla měřena na přístroji Struers DuraScan. Aby bylo dosaženo co možná největší citlivosti měření, bylo u obou materiálů experimentálně zjištěno nejmenší použitelné zatížení, kdy jsou vtisky čitelné. Pro měření průběhu tvrdosti u obou materiálů byla zvolena metoda HV 0,005.

Mikrotvrdost byla měřena do hloubky 2 mm od povrchu materiálu. Úhlopříčka zkušebního vtisku byla 5,5 μ m. Aby byly dodrženy všechny zásady pro správné měření, jako je minimální rozestup mezi vtisky a vzdálenost vtisku od kraje materiálu, byl první vtisk umístěn vždy 20 μ m od okraje materiálu. Rozestup mezi vtisky byl zvolen, vzhledem k celkové hloubce měření, 0,1 mm.

9.1 Naměřené hodnoty

V následujících kapitolách 9.1.1 a 9.1.2 jsou shrnuty výsledky měření mikrotvrdosti experimentálních materiálů 08CH18N10T a 14CH17N2.

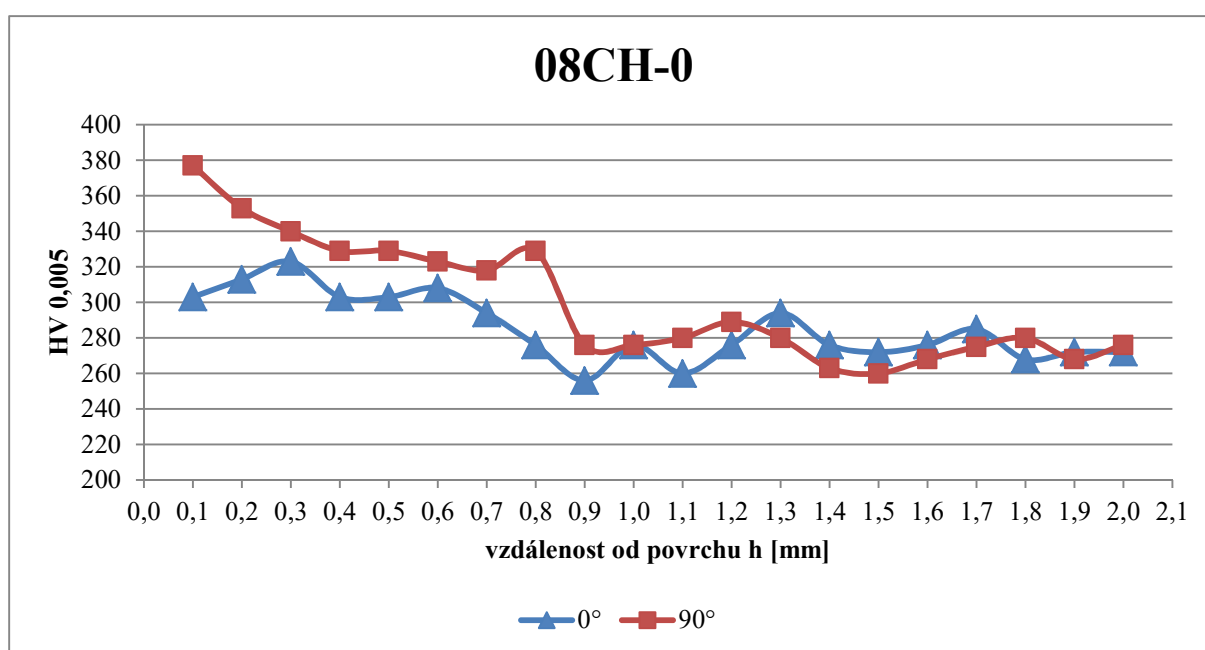
9.1.1 08CH18N10T

Tab. 11: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorku 08CH-0 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném 0° a příčném 90° výbrusu)

	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
08CH-0	0,1	303	377
	0,2	313	353
	0,3	323	340
	0,4	303	329
	0,5	303	329
	0,6	308	323
	0,7	294	318
	0,8	276	329
	0,9	256	276
	1,0	276	276
	1,1	260	280
	1,2	276	289

	1,3	294	280
	1,4	276	263
	1,5	272	260
	1,6	276	268
	1,7	285	275
	1,8	268	280
	1,9	272	268
	2,0	272	276

Graf 5: Průběh mikrotvrdomosti pod povrchem vzorku 08CH-0 na podélném a příčném výbrusu



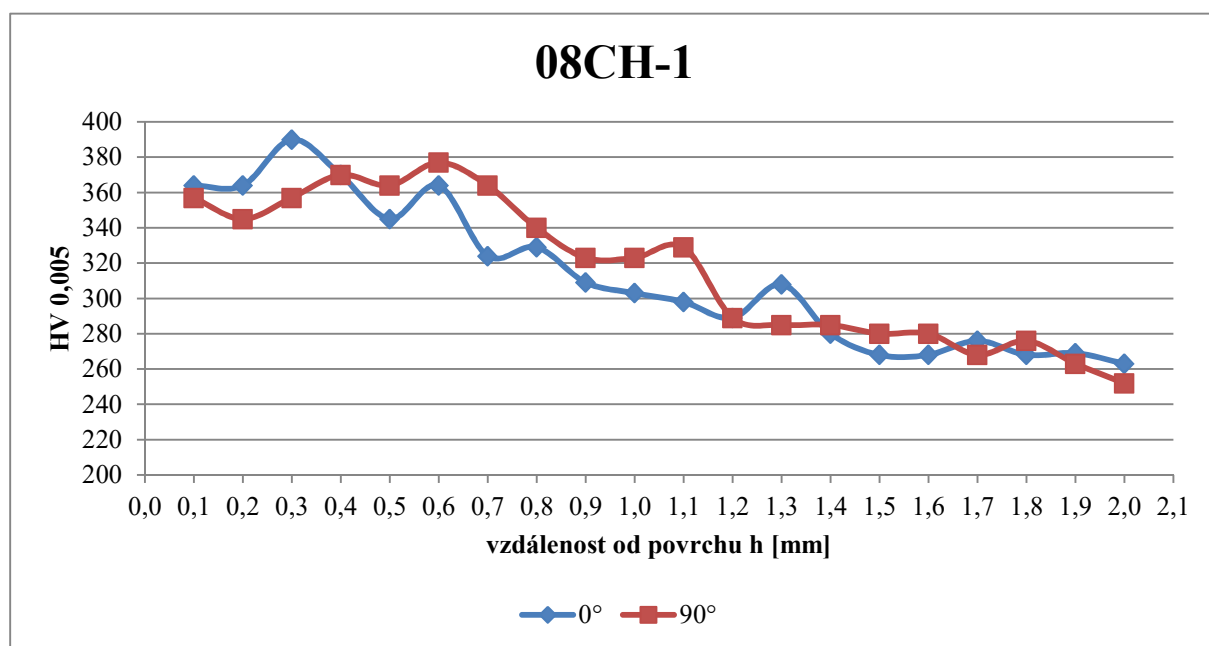
Broušený vzorek 08CH-0 vykazuje zvýšené hodnoty tvrdosti do hloubky 0,8 mm, poté skokově klesá a ustaluje se na hodnotách mezi 260 až 280 HV 0,005, viz Graf 5.

Tab. 12: Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti u vzorku 08CH-1 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném 0° a příčném 90° výbrusu)

	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
08CH-1	0,1	364	357
	0,2	364	345
	0,3	390	357
	0,4	370	370
	0,5	345	364
	0,6	364	377
	0,7	324	364

	0,8	329	340
	0,9	309	323
	1,0	303	323
	1,1	298	329
	1,2	289	289
	1,3	308	285
	1,4	280	285
	1,5	268	280
	1,6	268	280
	1,7	276	268
	1,8	268	276
	1,9	269	263
	2,0	263	252

Graf 6: Průběh mikrotvrdosti pod povrchem vzorku 08CH-1 na podélném a příčném výbrusu



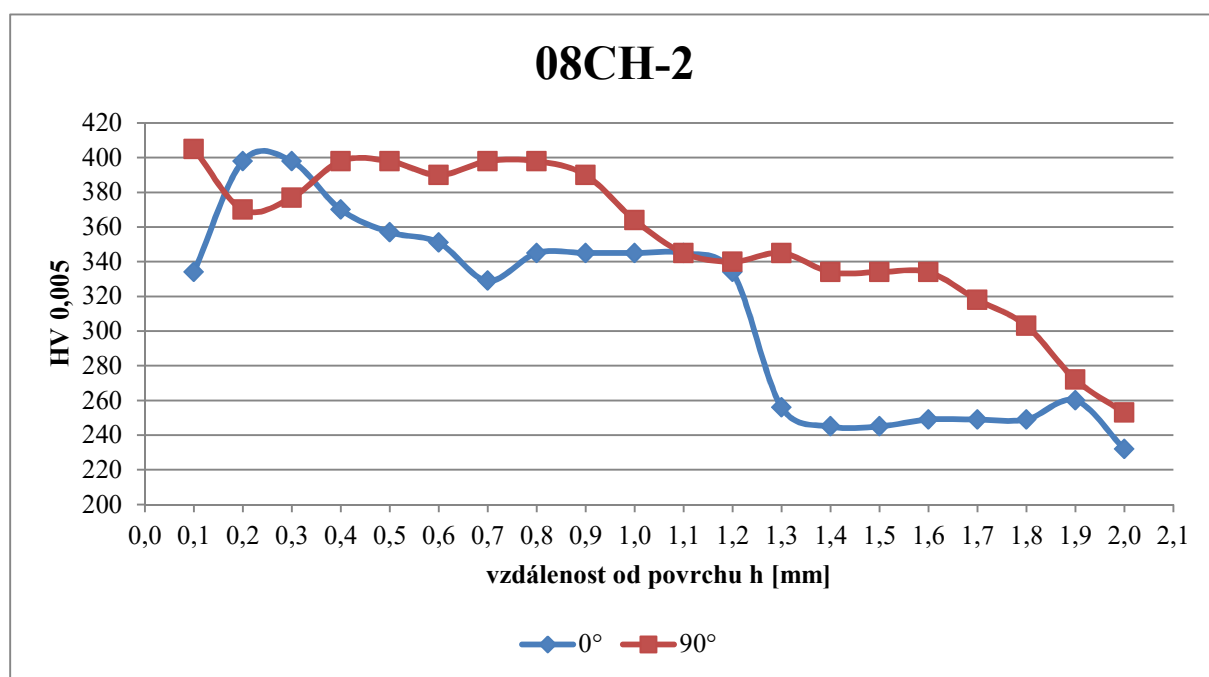
Tvrdost vzorku s jednou vrstvou LSP 08CH-1 klesá postupně až do hodnoty 1,5 mm, kde se začíná ustalovat, viz Graf 6.

Tab. 13: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorku 08CH-2 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném 0° a příčném 90° výbrusu)

08CH-2	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
	0,1	334	405
0,2	398	370	
0,3	398	377	

	0,4	370	398
	0,5	357	398
	0,6	351	390
	0,7	329	398
	0,8	345	398
	0,9	345	390
	1,0	345	364
	1,1	345	345
	1,2	334	340
	1,3	256	345
	1,4	245	334
	1,5	245	334
	1,6	249	334
	1,7	249	318
	1,8	249	303
	1,9	260	272
	2,0	232	253

Graf 7: Průběh mikrotvrlosti pod povrchem vzorku 08CH-2 na podélném a příčném výbrusu

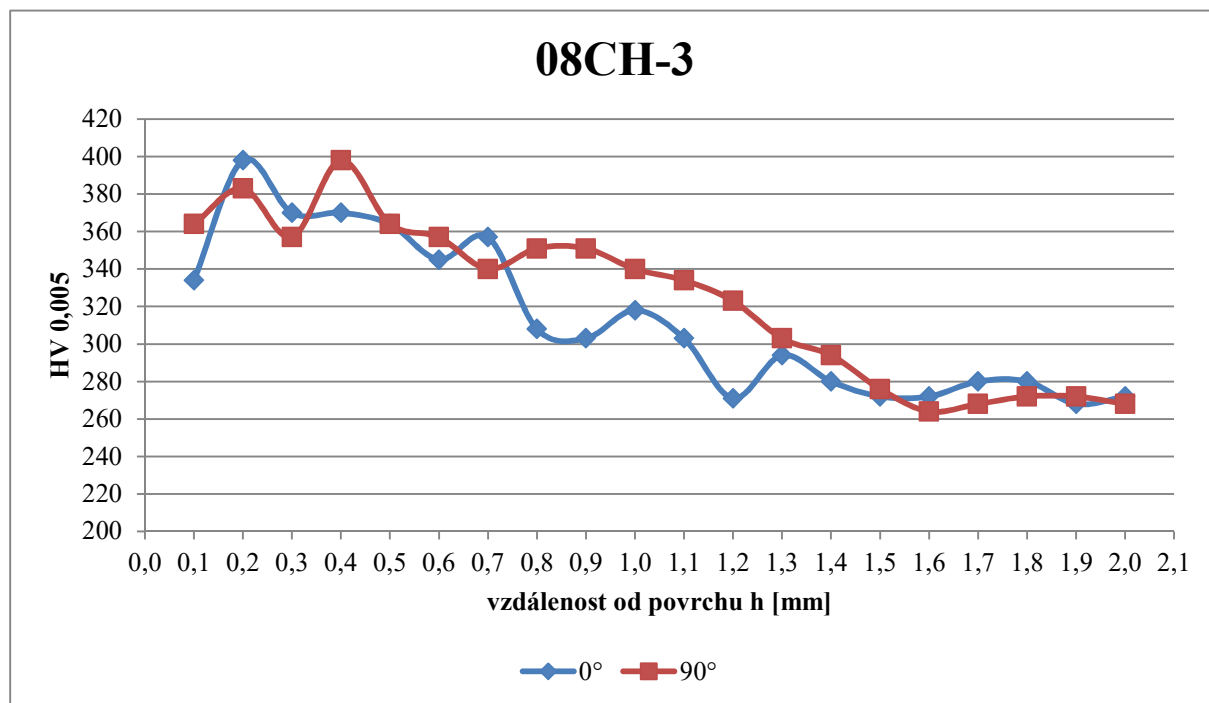


Tvrдость měřená na vzorku 08CH-2-90°, čili na příčném výbrusu, je do hloubky 0,9 mm téměř konstantní s hodnotami okolo 400 HV 0,005, následně klesne na hodnoty okolo 340 HV 0,005, kde se ustaluje až do hloubky 1,6 mm a následně klesá až do hloubky 2 mm. Na podélném výbrusu nastává v hloubce mezi 1,2 a 1,3 mm skokový pokles na hodnoty okolo 250 HV 0,005, na které se ustaluje. Tento průběh je zobrazen v grafu (Graf 7).

Tab. 14: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorku 08CH-3 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném - 0° a příčném - 90° výbrusu)

08CH-3	h	HV 0,005 -	HV 0,005 -
	[mm]	0°	90°
	0,1	334	364
	0,2	398	383
	0,3	370	357
	0,4	370	398
	0,5	364	364
	0,6	345	357
	0,7	357	340
	0,8	308	351
	0,9	303	351
	1,0	318	340
	1,1	303	334
	1,2	271	323
	1,3	294	303
	1,4	280	294
	1,5	272	276
	1,6	272	264
	1,7	280	268
	1,8	280	272
	1,9	268	272
	2,0	272	268

Graf 8: Průběh mikrotvrlosti pod povrchem vzorku 08CH-3 na podélném a příčném výbrusu



V grafu (Graf 8) je vidět, že průběh tvrdosti vzorku 08CH-3 se podobá průběhu tvrdosti vzorku 08CH-1. Tvrdost postupně klesá a v hloubce 1,5 mm se začíná ustalovat. Rozdíly mezi podélným a příčným výbrusem jsou rovněž malé.

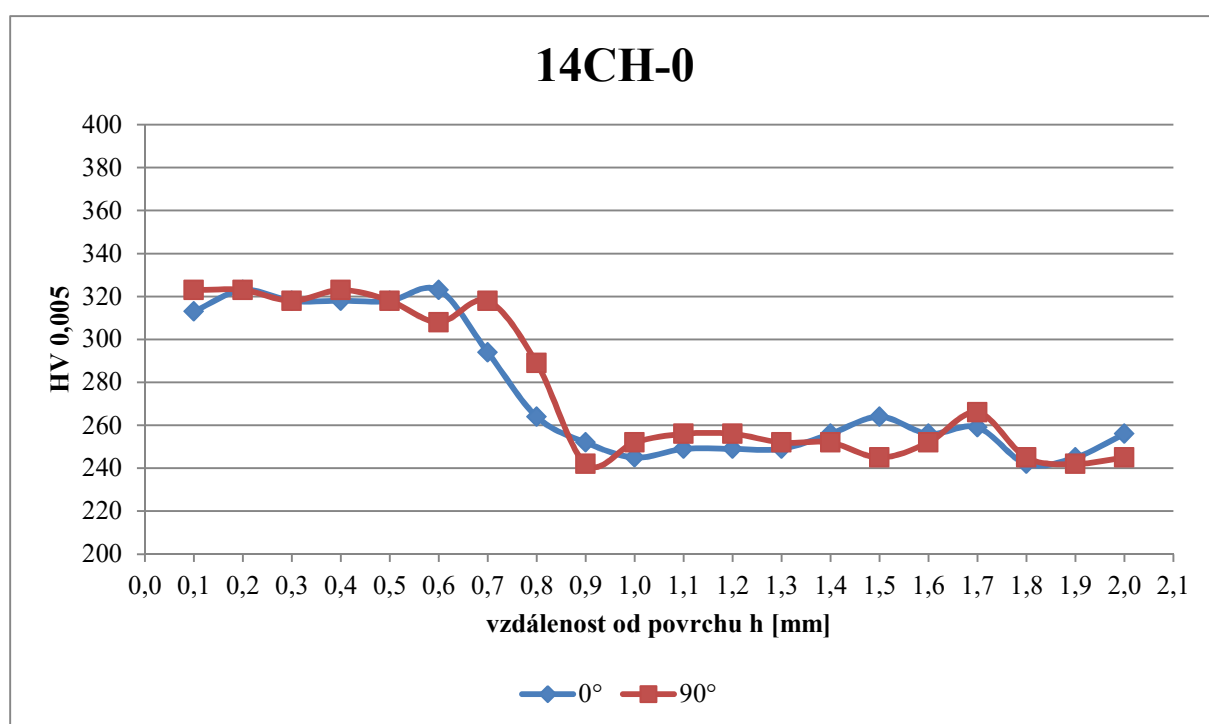
9.1.2 14CH17N2

Tab. 15: Naměřené hodnoty mikrotvrlosti u vzorku 14CH-0 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném - 0° a příčném - 90° výbrusu)

	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
14CH-0	0,1	313	323
	0,2	323	323
	0,3	318	318
	0,4	318	323
	0,5	318	318
	0,6	323	308
	0,7	294	318
	0,8	264	289
	0,9	252	242
	1,0	245	252
	1,1	249	256
	1,2	249	256

	1,3	249	252
	1,4	256	252
	1,5	264	245
	1,6	256	252
	1,7	259	266
	1,8	242	245
	1,9	245	242
	2,0	256	245

Graf 9: Průběh mikrotvrdosti pod povrchem vzorku 14CH-0 na podélném a příčném výbrusu



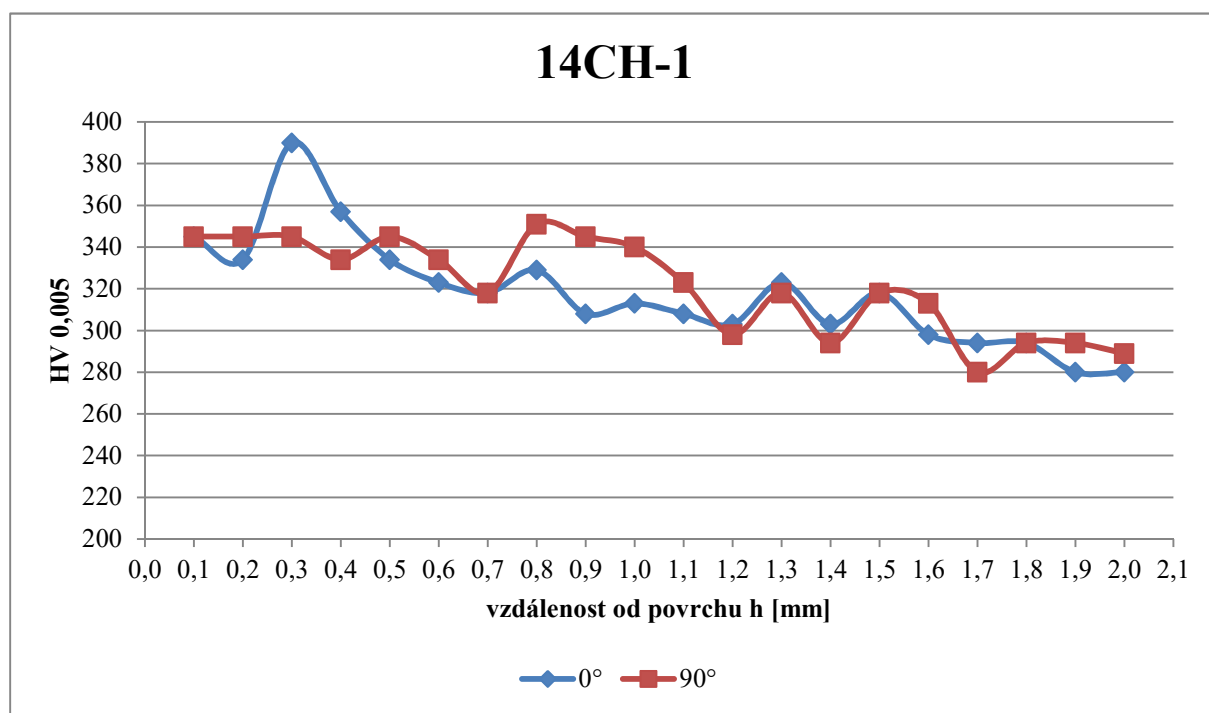
Graf 9 popisuje průběh tvrdosti pod povrchem broušeného vzorku 14CH-0. Do 0,7 mm hloubky materiálu je tvrdost téměř konstantní, s hodnotou cca 320 HV 0,005 poté skokově klesá na hodnoty okolo 250 HV 0,005, kde se ustaluje.

Tab. 16: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorku 14CH-1 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném - 0° a příčném - 90° výbrusu)

14CH-1	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
	0,1	345	345
0,2	334	345	
0,3	390	345	
0,4	357	334	
0,5	334	345	

	0,6	323	334
	0,7	318	318
	0,8	329	351
	0,9	308	345
	1,0	313	340
	1,1	308	323
	1,2	303	298
	1,3	323	318
	1,4	303	294
	1,5	318	318
	1,6	298	313
	1,7	294	280
	1,8	294	294
	1,9	280	294
	2,0	280	289

Graf 10: Průběh mikrotvrdosti pod povrchem vzorku 14CH-1 na podélném a příčném výbrusu

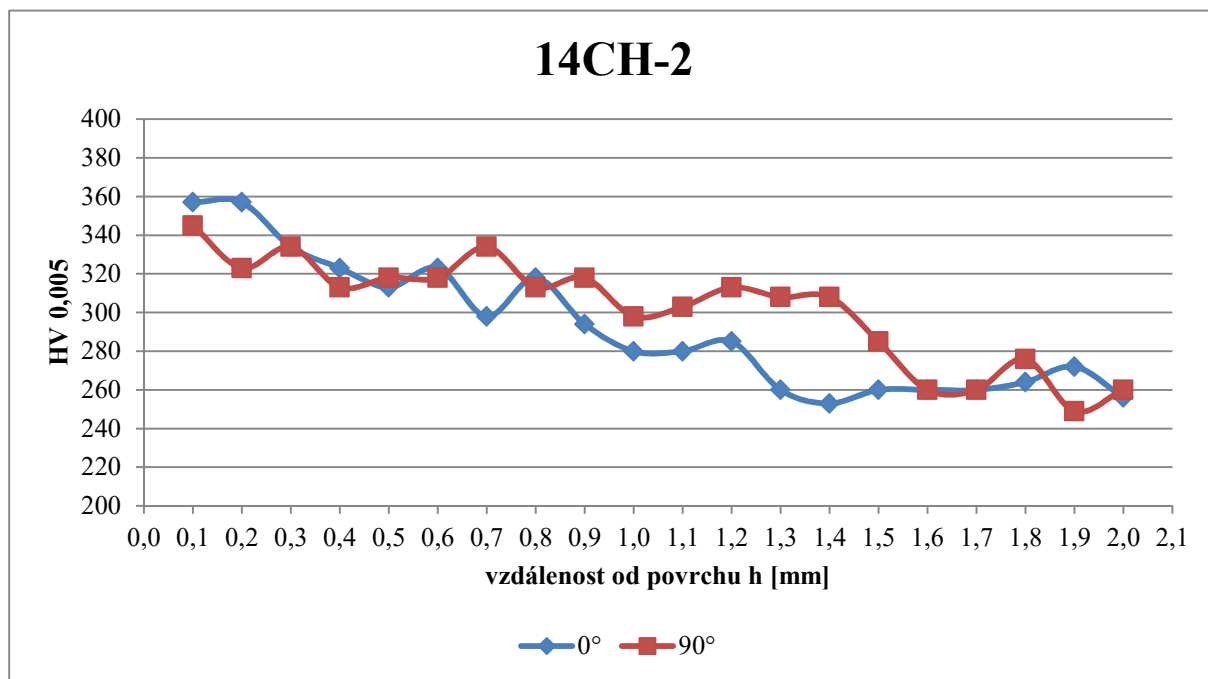


Tvrdost vzorku 14CH-1 pozvolna klesá do hloubky přibližně 1,6 mm, kde se začíná ustálovat, viz Graf 10.

Tab. 17: Naměřené hodnoty mikrotvrdości u vzorku 14CH-2 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném - 0° a příčném - 90° výbrusu)

14CH-2	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
	0,1	357	345
	0,2	357	323
	0,3	334	334
	0,4	323	313
	0,5	313	318
	0,6	323	318
	0,7	298	334
	0,8	318	313
	0,9	294	318
	1,0	280	298
	1,1	280	303
	1,2	285	313
	1,3	260	308
	1,4	253	308
	1,5	260	285
	1,6	260	260
	1,7	260	260
	1,8	264	276
	1,9	272	249
2,0	256	260	

Graf 11: Průběh mikrotvrdosti pod povrchem vzorku 14CH-2 na podélném a příčném výbrusu



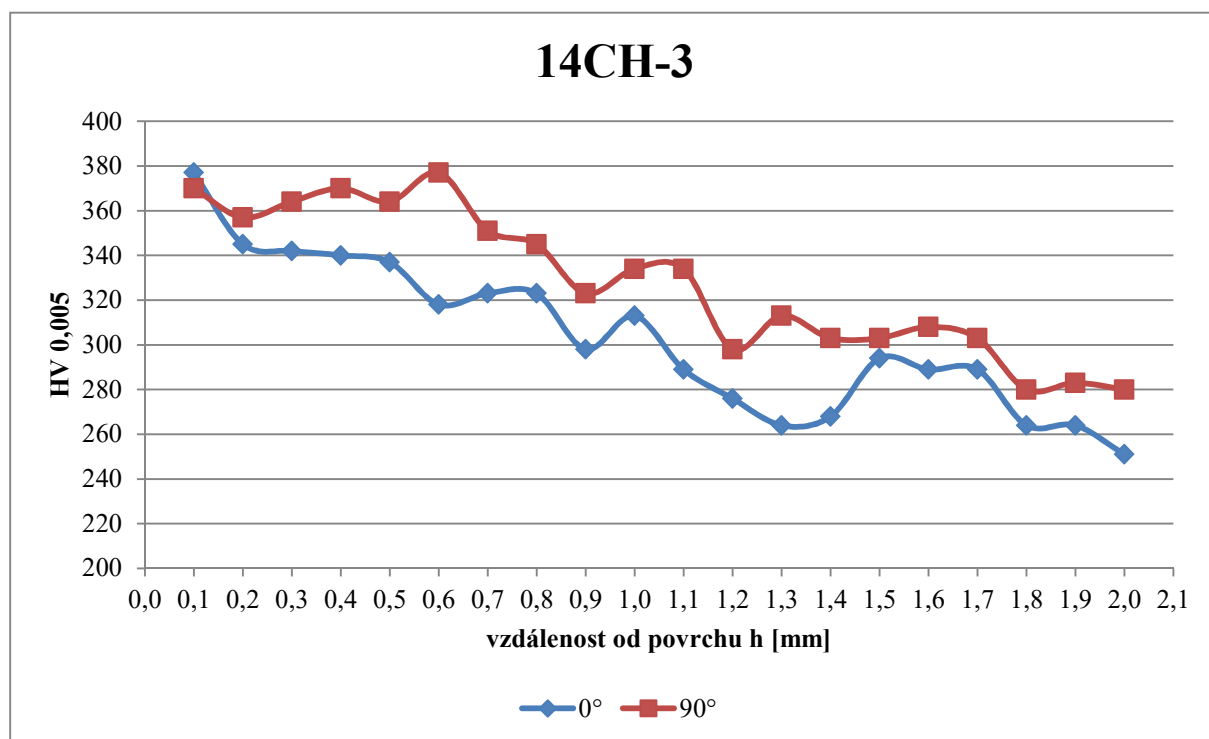
Průběh tvrdosti u vzorku 14CH-2 je postupně klesající z hodnot okolo 350 HV 0,005 až k hodnotám okolo 260 HV 0,005 v hloubce 1,6 mm kde se ustálí, viz Graf 11.

Tab. 18: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorku 14CH-3 (v prvním sloupci je vzdálenost od povrchu, v dalších sloupcích jsou naměřené hodnoty tvrdosti na podélném - 0° a příčném - 90° výbrusu)

14CH-3	h [mm]	HV 0,005 - 0°	HV 0,005 - 90°
	0,1	377	370
0,2	345	357	
0,3	342	364	
0,4	340	370	
0,5	337	364	
0,6	318	377	
0,7	323	351	
0,8	323	345	
0,9	298	323	
1,0	313	334	
1,1	289	334	
1,2	276	298	
1,3	264	313	
1,4	268	303	
1,5	294	303	

	1,6	289	308
	1,7	289	303
	1,8	264	280
	1,9	264	283
	2,0	251	280

Graf 12: Průběh mikrotvrdosti pod povrchem vzorku 14CH-3 na podélném a příčném výbrusu



Tvrdost vzorku 14CH-3 klesá postupně z hodnot cca 380 HV 0,005 na hodnoty mezi 260 až 280 HV 0,005 v hloubce 1,8 mm, kde se ustálí, tento průběh zachycuje Graf 12.

10 Měření jakosti povrchu Ra

Motivací pro měření drsnosti povrch Ra bylo ověření informace, že technologie LSP zlepšuje jakost povrchu. Vzhledem ke vzniku zpravidla viditelného reliéfu na povrchu materiálu po aplikaci technologie LSP zní tato informace rozporuplně.

Drsnost povrchu byla měřena na optickém profilometru Keyence VKX 100. Nejprve proběhla kalibrace přístroje pomocí rugotestu. Ze vzorkovnice RUGOTEST 1 byl vybrán vzorek nejvíce podobný zkoumaným povrchům A - N5. Tento vzorek byl vložen do přístroje, kde byla měřena hodnota Ra a postupně se upravovaly parametry λ_s a λ_c , dokud se naměřená hodnota neshodovala s hodnotou udanou na rugotestu pro daný vzorek. Parametry měření jsou uvedené v Tab. 19.

Tab. 19: Parametry měření drsnosti povrchu Ra

Měřená plocha [mm ²]	Objektiv	λ_s [μm]	λ_c [μm]
25 (5x5 mm)	20x	0,25	0,08

Byla měřena lineární a plošná drsnost. Lineární byla měřena ve směrech 0° a 90°, viz Obr. 20.

10.1 Naměřené hodnoty

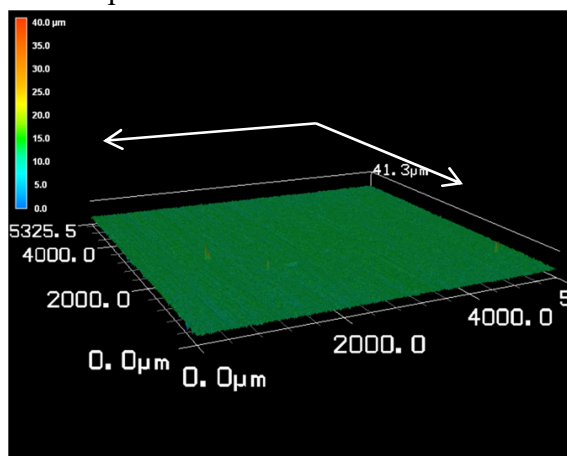
Naměřené hodnoty plošné a lineární drsnosti experimentálních povrchů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

10.1.1 08CH18N10T

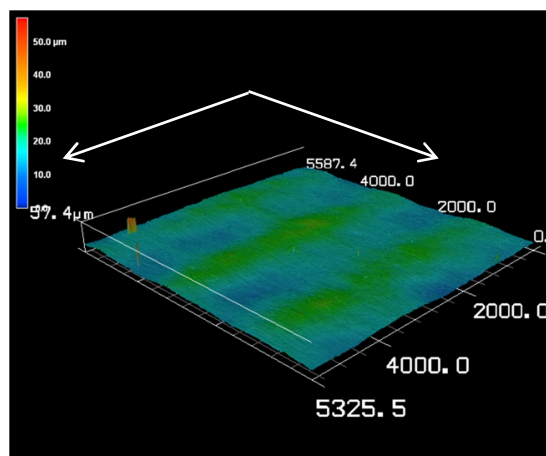
Tab. 20: Neměřené hodnoty Ra u materiálu 08CH18N10T

	08CH-0		08CH-1		08CH-2		08CH-3	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Ra lin [μm]	0,38	0,68	0,23	0,46	0,26	0,45	0,21	0,44
Ra plo [μm]	0,69		0,49		0,47		0,45	

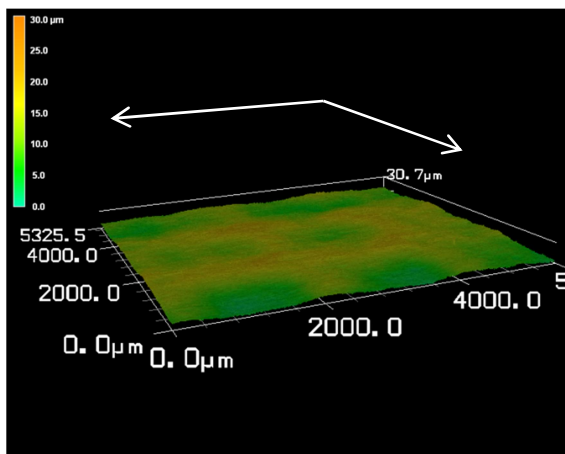
Měření prokázalo, že u materiálu 08CH18N10T opravdu dochází ke snížení drsnosti povrchu. U broušeného vzorku byly naměřeny lineární drsnosti 0,38 μm ve směru podélném - 0° (tento směr je zároveň shodný se směrem broušení) a 0,68 μm v příčném směru - 90°. Plošná drsnost má hodnotu 0,69 μm. Vzorek 08CH-1 vykazuje snížení lineární drsnosti o 0,15 μm ve směru 0° a o 0,22 μm ve směru 90°. Plošná drsnost se pak snížila o 0,2 μm. Rozdíly v drsnostech vzorků s různým počtem vrstev LSP nejsou již tak markantní a pohybují se v řádech setin μm. Na obrázcích Obr. 31 až Obr. 34 jsou zobrazeny naskenované povrchy vzorků z optického profilometru.



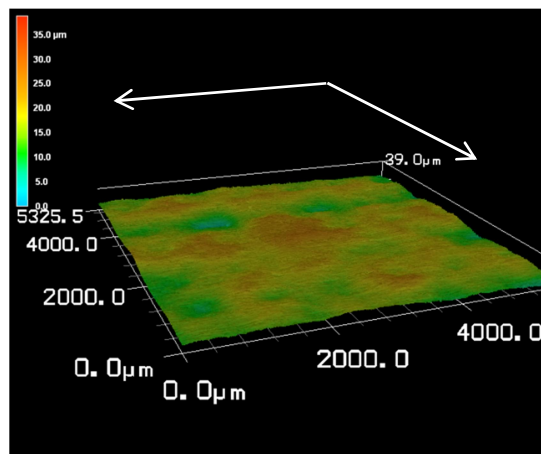
Obr. 31: Scan povrchu vzorku 08CH-0



Obr. 32: Scan povrchu vzorku 08CH-1



Obr. 33: Scan povrchu vzorku 08CH-2



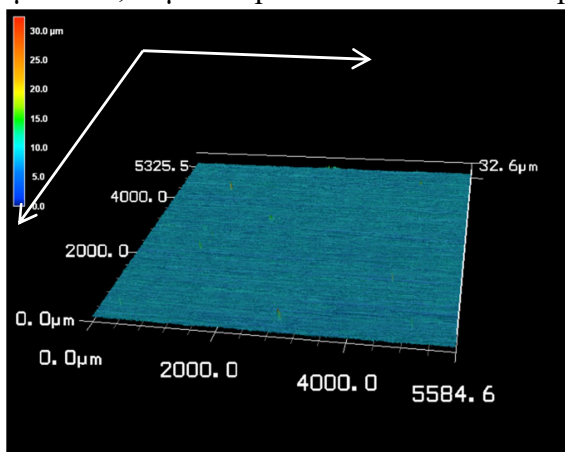
Obr. 34: Scan povrchu vzorku 08CH-3

10.1.2 14CH17N2

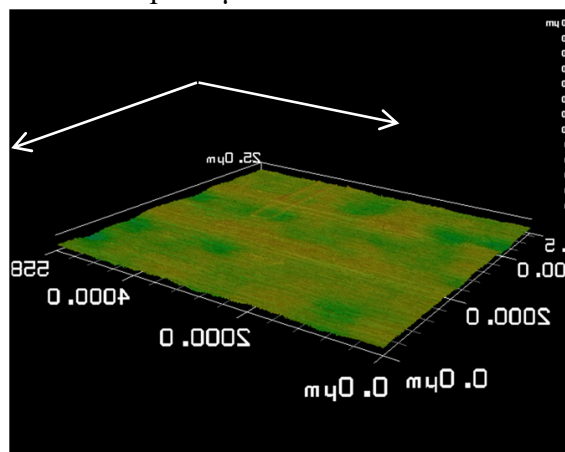
Tab. 21: Neměřené hodnoty Ra u materiálu 14CH17N2

	14CH-0		14CH-1		14CH-2		14CH-3	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Ra lin [μm]	0,45	0,65	0,33	0,66	0,25	0,54	0,31	0,69
Ra plo [μm]	0,79		0,66		0,66		0,67	

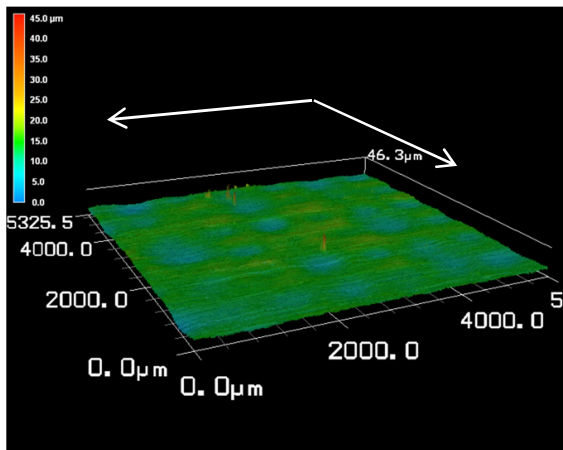
U materiálu 14CH17N2 došlo ke snížení lineární drsnosti ve směru 0° a plošné drsnosti povrchu Ra. Podobné hodnoty lineární drsnosti byly naměřeny u vzorku s jednou a třemi vrstvami LSP. Oproti broušenému povrchu došlo k poklesu o 0,12 resp. 0,14 μm ve směru 0°. Ve směru 90° se u obou vzorků drsnost nepatrně zhoršila. U vzorku se dvěma vrstvami došlo k poklesu v obou směrech. Ve směru 0° to bylo o 0,20 μm na 0,25 μm a ve směru 90° o 0,11 μm na 0,54 μm. U plošné drsnosti došlo k poklesu o 13 resp. 12 μm u vzorku 14CH-3.



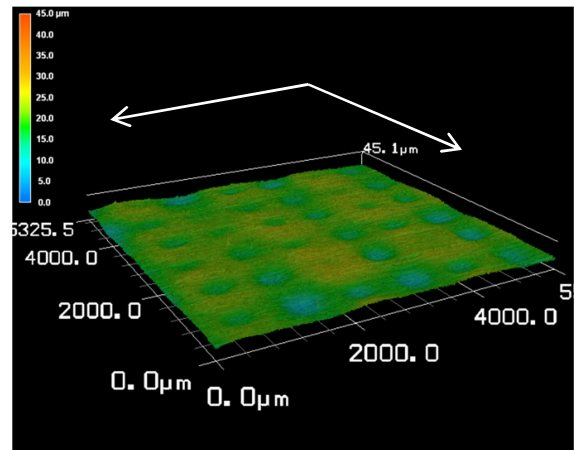
Obr. 35: Scan povrchu vzorku 14CH-0



Obr. 36: Scan povrchu vzorku 14CH-1



Obr. 37: Scan povrchu vzorku 14CH-2



Obr. 38: Scan povrchu vzorku 14CH-3

11 Hodnocení mikrostruktury

Technologie LSP vyvolává v materiálu mikrostrukturní změny viz kapitola 1.3.1. V podpovrchové vrstvě by měla být viditelná jemnozrná struktura.

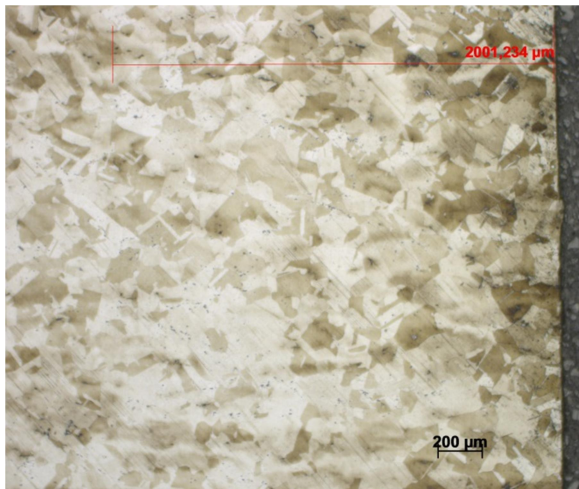
Na zhotovených podélných a příčných výbrusech bylo provedeno leptání na zrno. U obou materiálů bylo použito leptadlo Adler po dobu 3 s. Naleptané vzorky byly pozorovány na světelném mikroskopu a byla porovnávána struktura v podpovrchové vrstvě a v hloubce 2 mm pod povrchem. Pro lepší představu je tato vzdálenost vyznačena na makrosnímčích struktury.

Povrch ošetřený technologií LSP se nachází vždy na pravé straně snímku.

U materiálu 08CH18N10T je rozdíl velikosti austenitických zrn v podpovrchové vrstvě a v hloubce 2 mm nejvíce vidět na podélném výbrusu vzorku 08CH-2 (Obr. 47 a Obr. 48). U vzorku 08CH-0 pochopitelně rozdíly nejsou. Obecně lze říci, že u vzorků ošetřených LSP z materiálu 08CH18N10T jsou větší rozdíly velikosti zrn na podélných řezech, kromě vzorku se třemi vrstvami (Obr. 59 až Obr. 62). Snímky týkající se materiálu jsou na Obr. 39 až Obr. 62 na následujících stranách v kapitole 11.1.

U martenzitické struktury materiálu 14CH17N2 jsou rozdíly ve velikosti zrn na první pohled hůře viditelné, po detailnějším zkoumání jsou vidět hranice původních austenitických zrn, kde jsou vidět rozdíly. Struktura u všech vzorků, kromě broušeného, je v podpovrchové vrstvě jemnější než ve 2 mm hloubce. Snímky vzorků z materiálu 14CH17N2 jsou na Obr. 63 až Obr. 86 v kapitole 11.2.

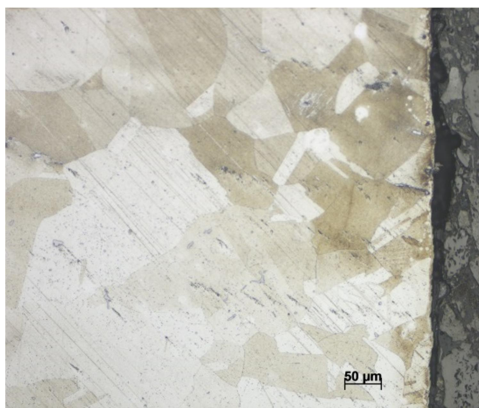
11.1 08CH18N10T



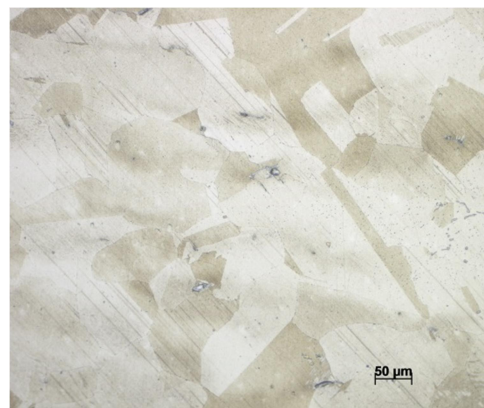
Obr. 39: Makrosnímek vzorku 08CH-0-0° (5x)



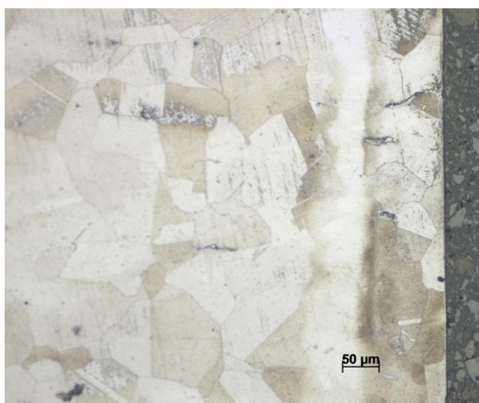
Obr. 40: Makrosnímek vzorku 08CH-0-90° (5x)



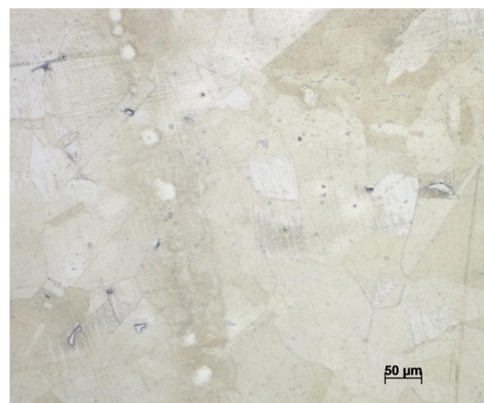
Obr. 41: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-0-0° (20x)



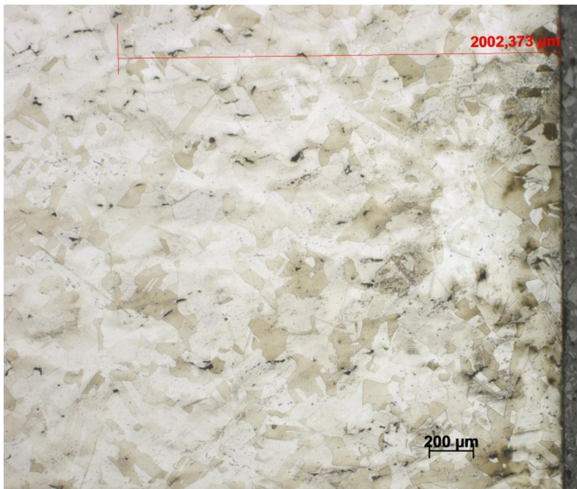
Obr. 42: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-0-0° (20x)



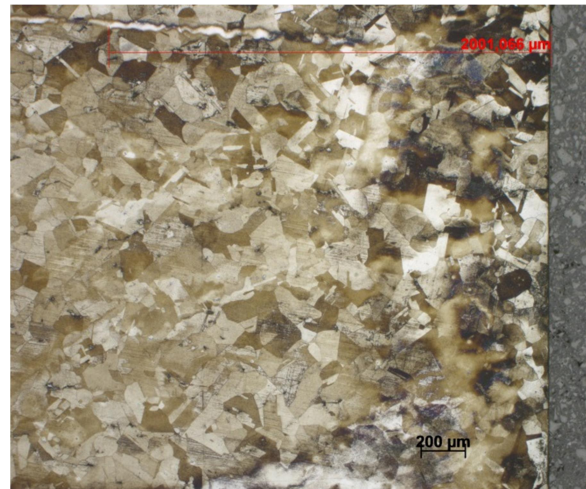
Obr. 43: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-0-90° (20x)



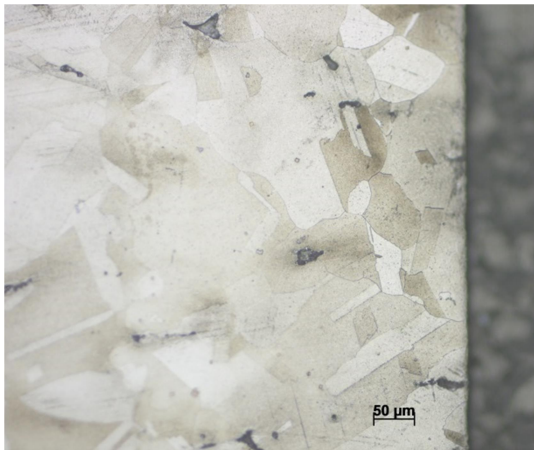
Obr. 44: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-0-90° (20x)



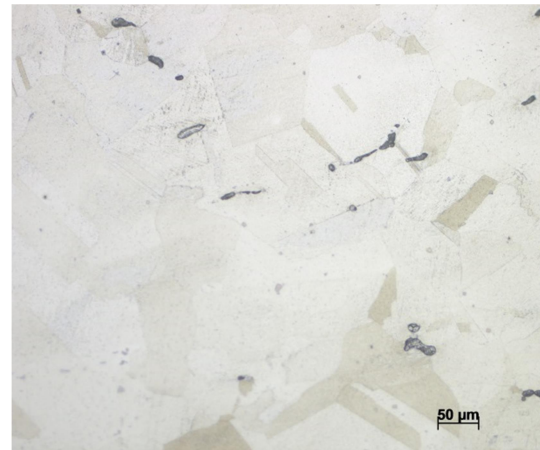
Obr. 45: Makrosnímek vzorku 08CH-1-0° (5x)



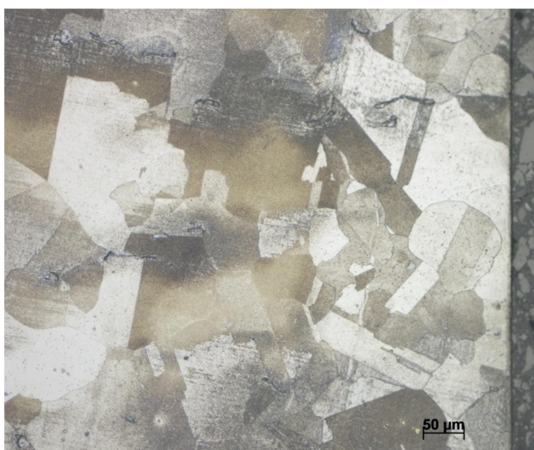
Obr. 46: Makrosnímek vzorku 08CH-1-90° (5x)



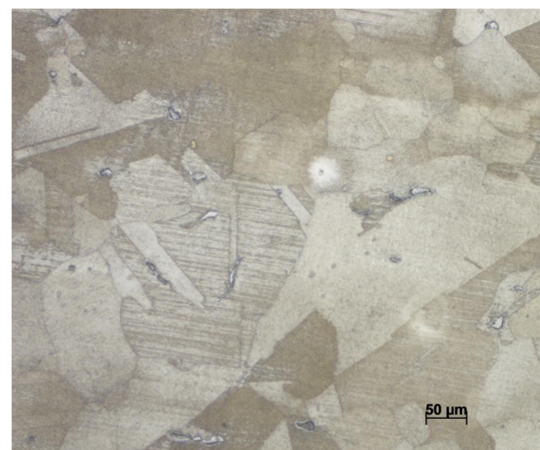
Obr. 47: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-1-0° (20x)



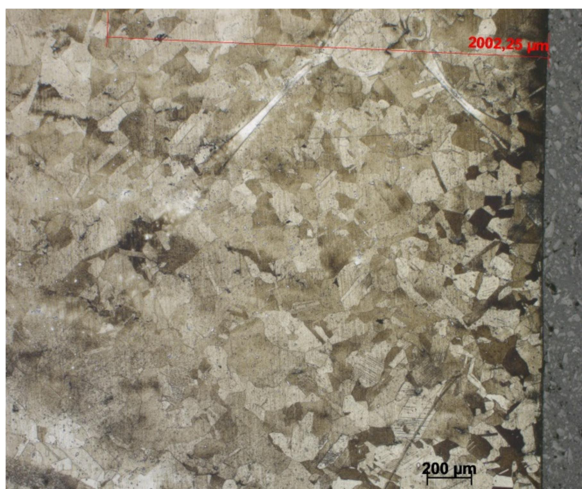
Obr. 48: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-1-0° (20x)



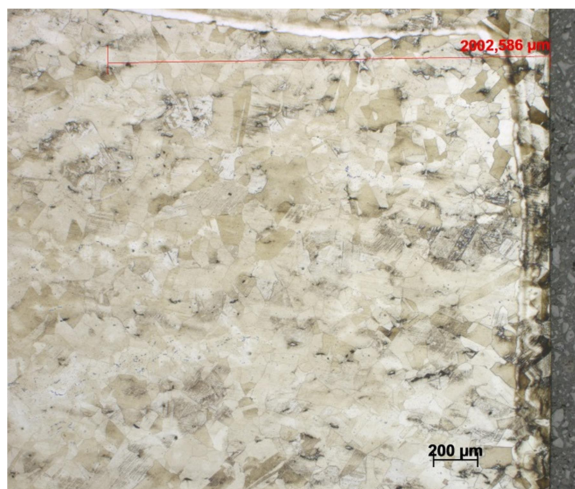
Obr. 49: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-1-90° (20x)



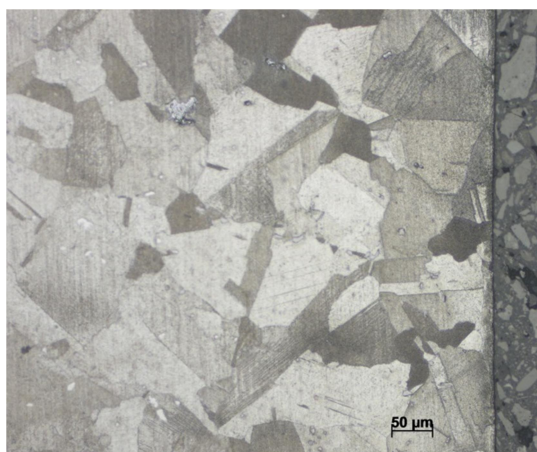
Obr. 50: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-1-90° (20x)



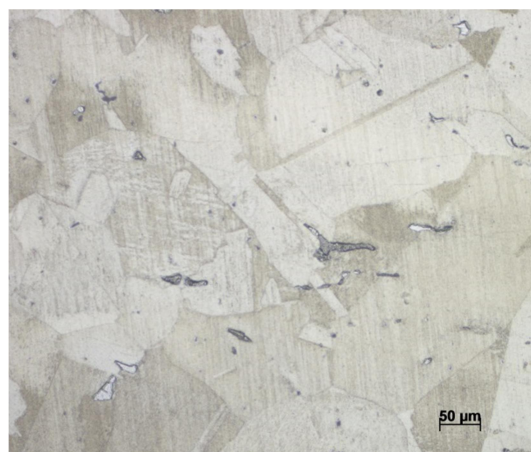
Obr. 51: Makrosnímek vzorku 08CH-2-0° (5x)



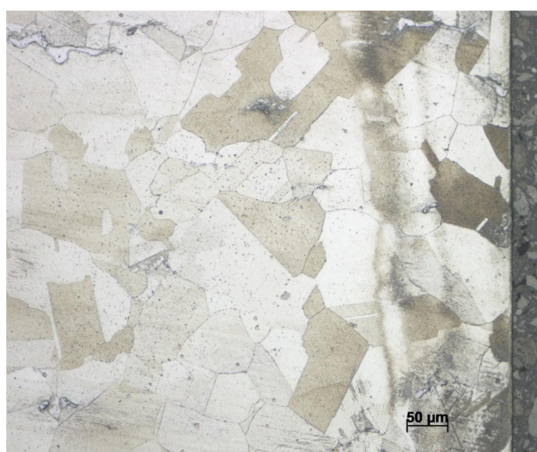
Obr. 52: Makrosnímek vzorku 08CH-2-90° (5x)



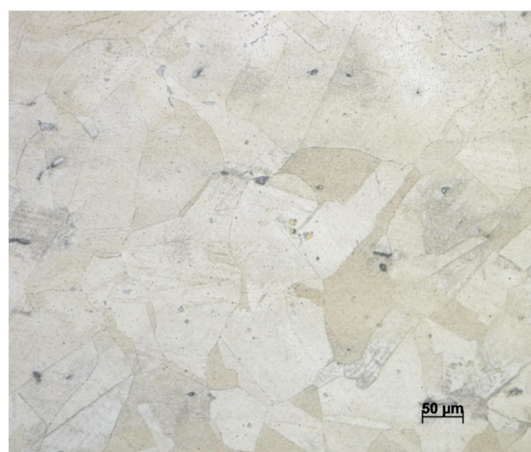
Obr. 53: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-2-0° (20x)



Obr. 54: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-2-0° (20x)



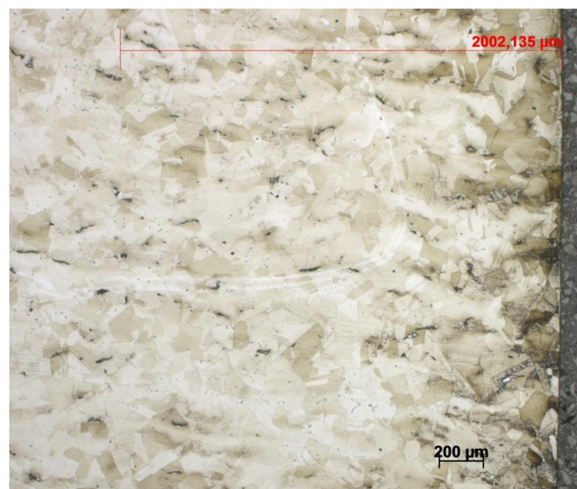
Obr. 55: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 08CH-2-90° (20x)



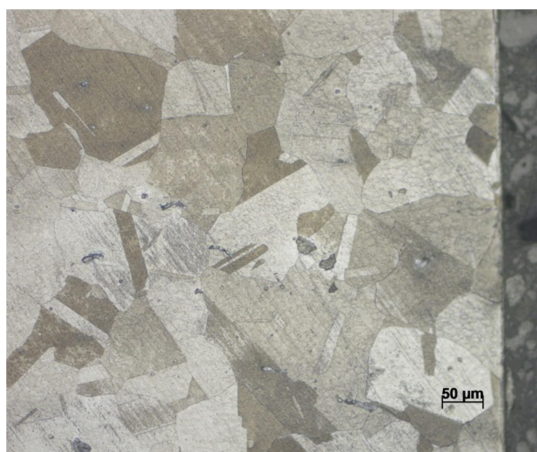
Obr. 56: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 08CH-2-90° (20x)



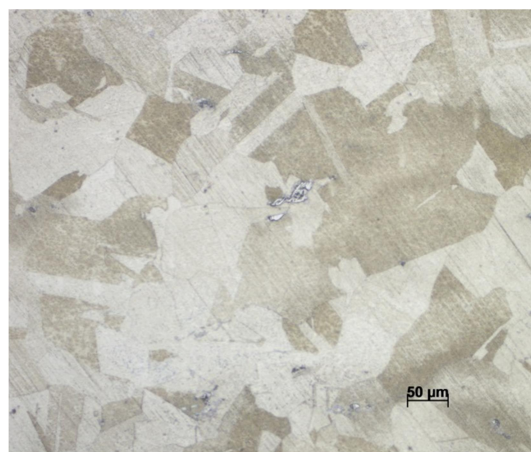
Obr. 57: Makrosnímek vzorku 08CH-3-0° (5x)



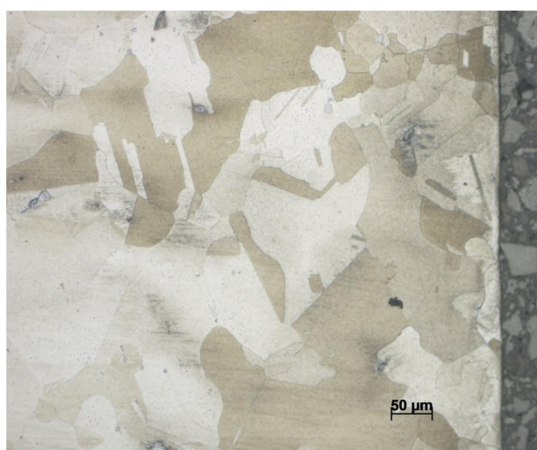
Obr. 58: Makrosnímek vzorku 08CH-3-90°
(5x)



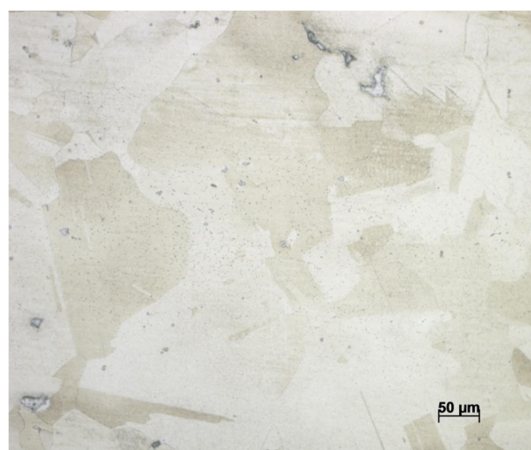
Obr. 59: Mikrostruktura povrchové vrstvy
vzorku 08CH-3-0° (20x)



Obr. 60: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem
vzorku 08CH-3-0° (20x)

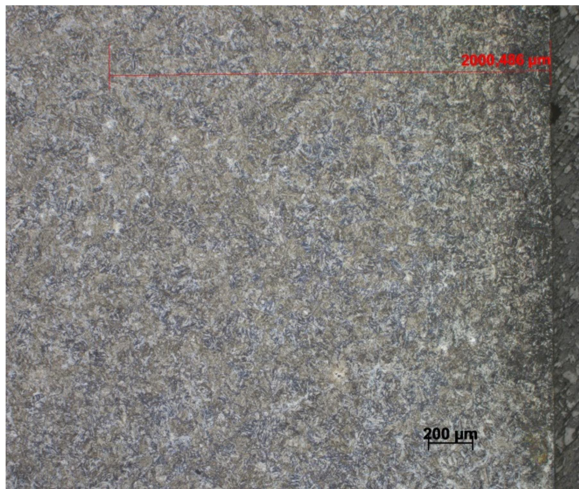


Obr. 61: Mikrostruktura povrchové vrstvy
vzorku 08CH-3-90° (20x)



Obr. 62: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem
vzorku 08CH-3-90° (20x)

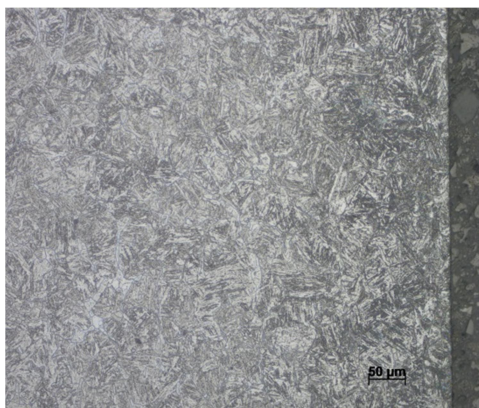
11.2 14CH17N2



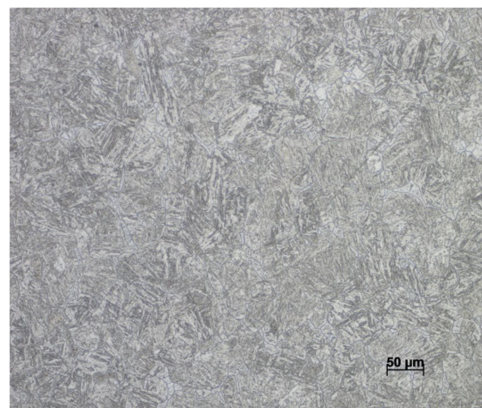
Obr. 63: Makrosnímek vzorku 14CH-0-0° (5x)



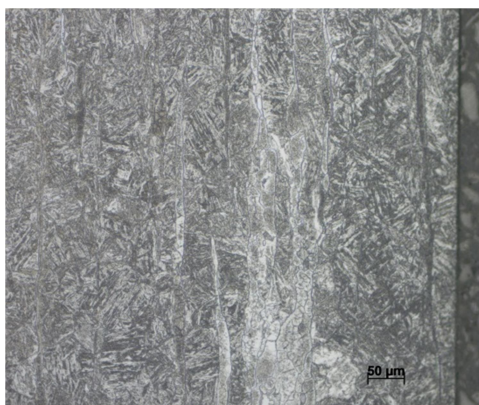
Obr. 64: Makrosnímek vzorku 14CH-0-90° (5x)



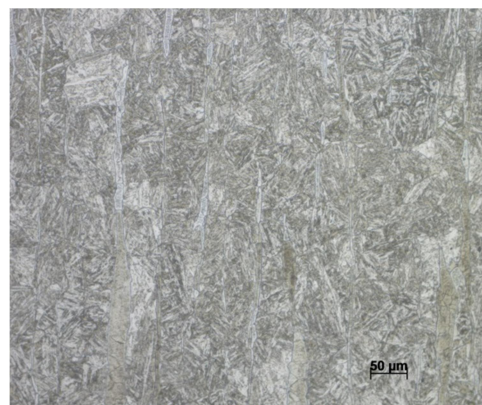
Obr. 65: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-0-0° (20x)



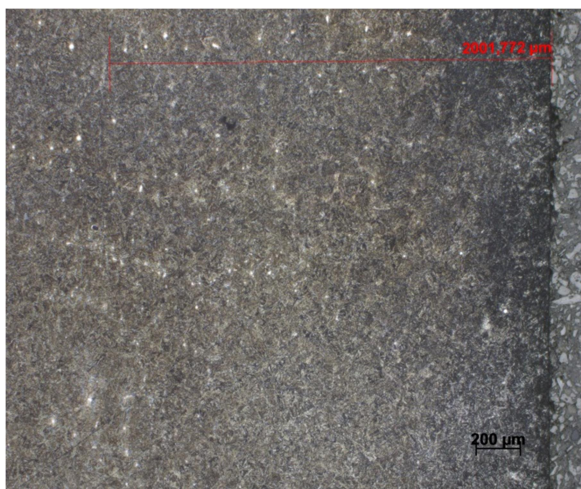
Obr. 66: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-0-0° (20x)



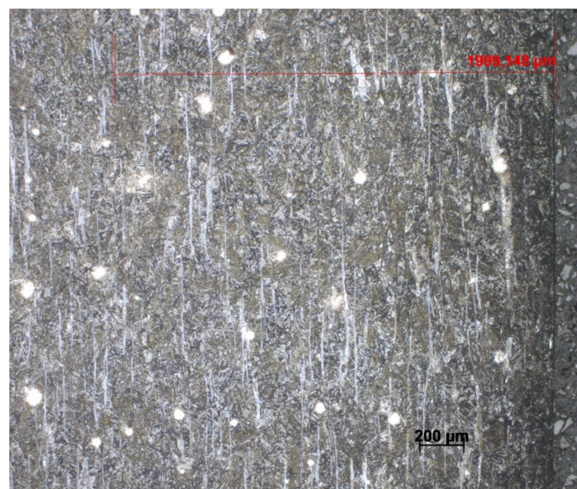
Obr. 67: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-0-90° (20x)



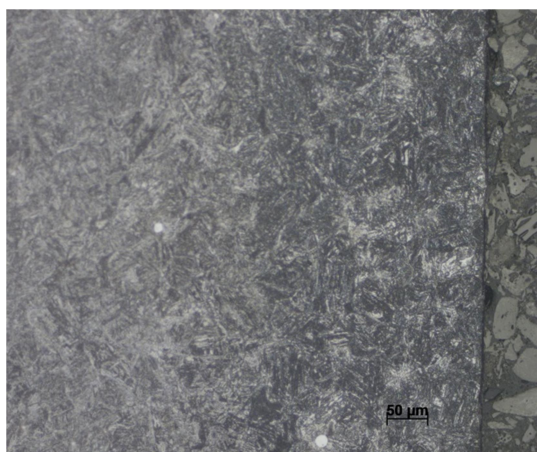
Obr. 68: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-0-90° (20x)



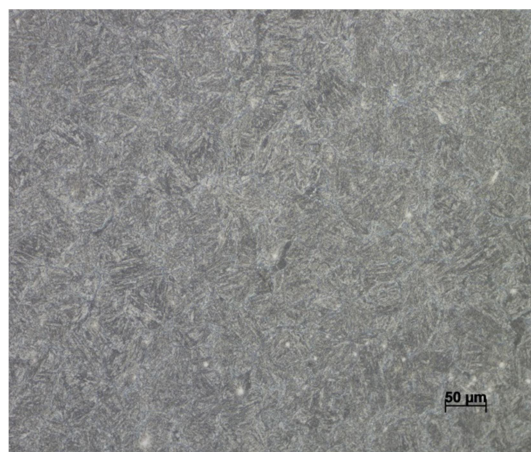
Obr. 69: Makrosnímek vzorku 14CH-1-0° (5x)



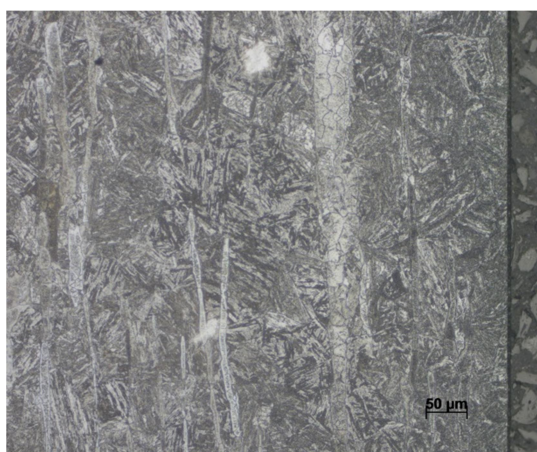
Obr. 70: Makrosnímek vzorku 14CH-1-90° (5x)



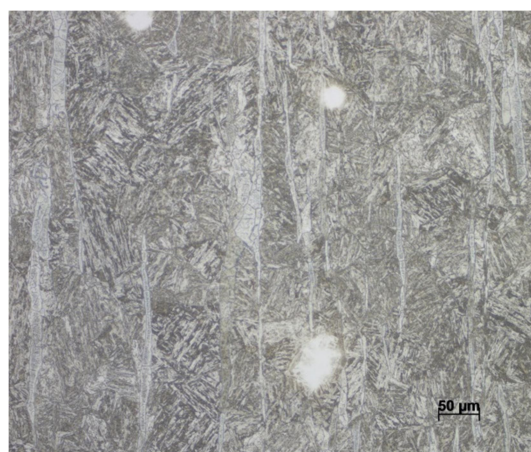
Obr. 71: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-1-0° (20x)



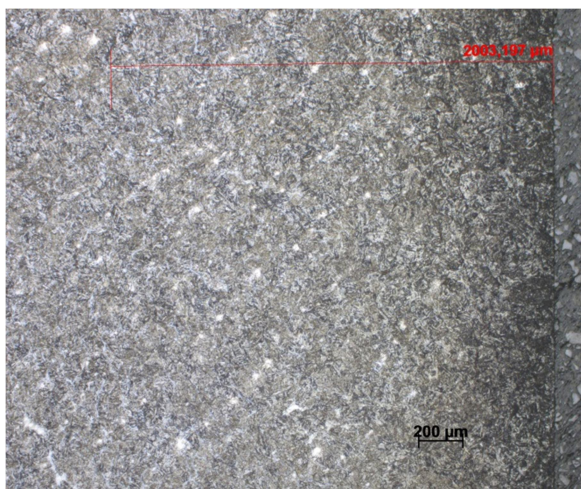
Obr. 72: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-1-0° (20x)



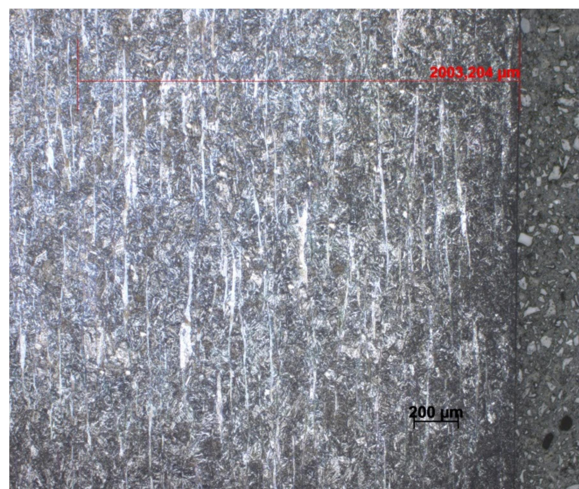
Obr. 73: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-1-90° (20x)



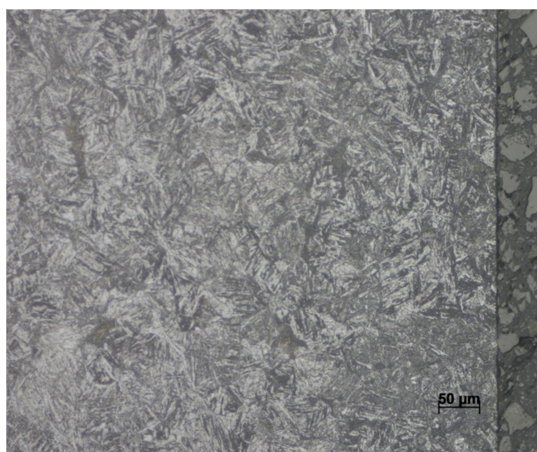
Obr. 74: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-1-90° (20x)



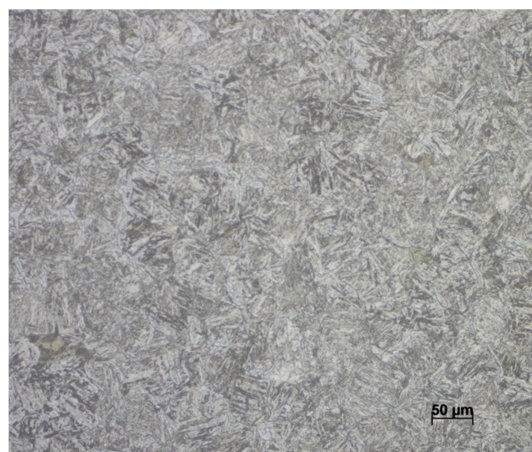
Obr. 75: Makrosnímek vzorku 14CH-2-0° (5x)



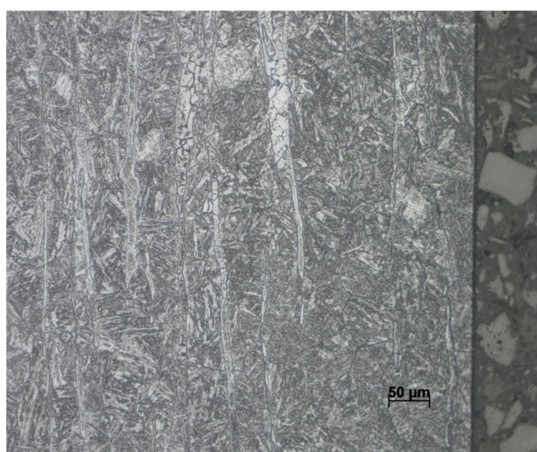
Obr. 76: Makrosnímek vzorku 14CH-2-90° (5x)



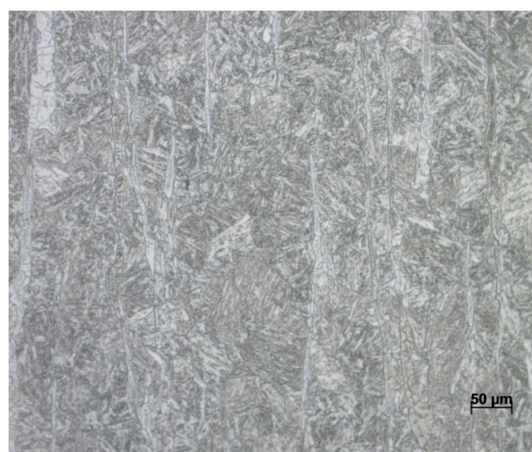
Obr. 77: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-2-0° (20x)



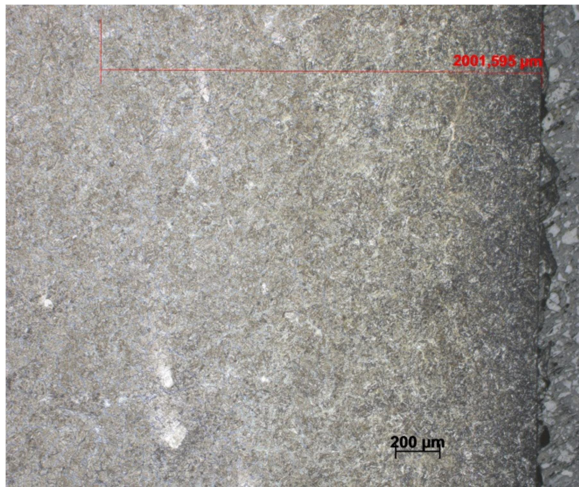
Obr. 78: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-2-0° (20x)



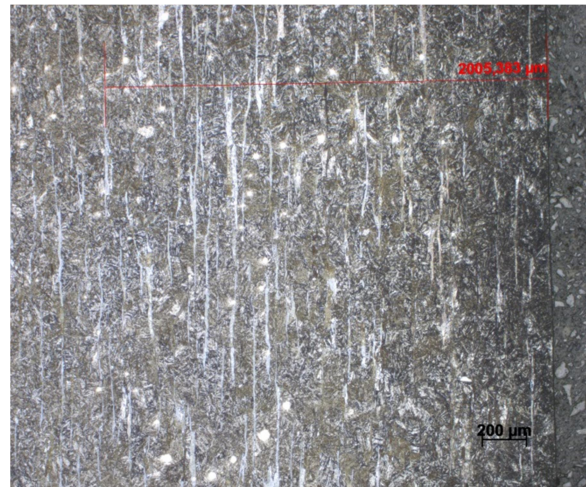
Obr. 79: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-2-90° (20x)



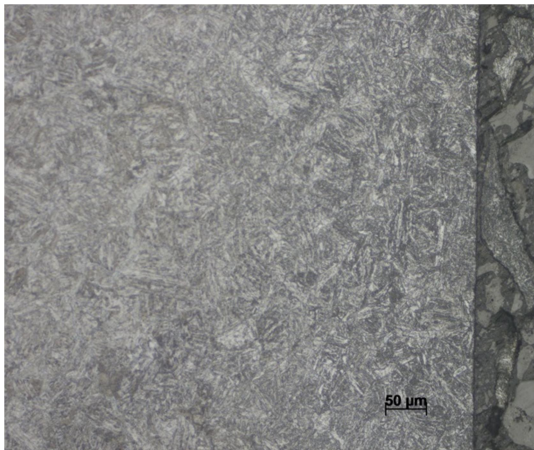
Obr. 80: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-2-90° (20x)



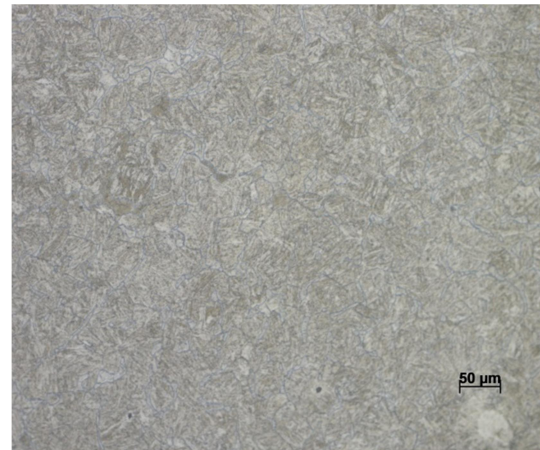
Obr. 81: Makrosnímek vzorku 14CH-3-0° (5x)



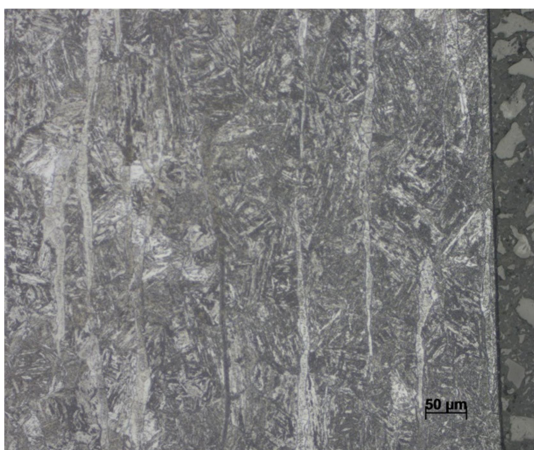
Obr. 82: Makrosnímek vzorku 14CH-3-90° (5x)



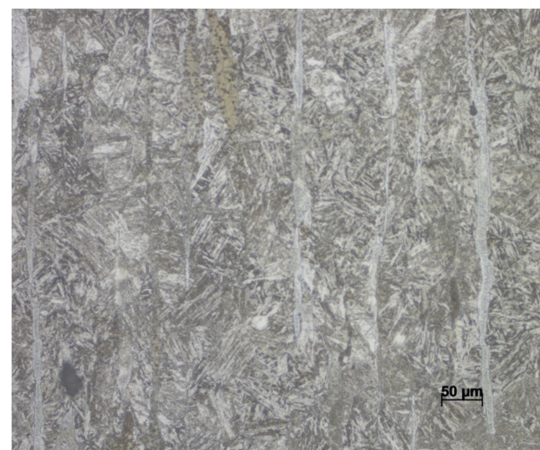
Obr. 83: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-3-0° (20x)



Obr. 84: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-3-0° (20x)



Obr. 85: Mikrostruktura povrchové vrstvy vzorku 14CH-3-90° (20x)

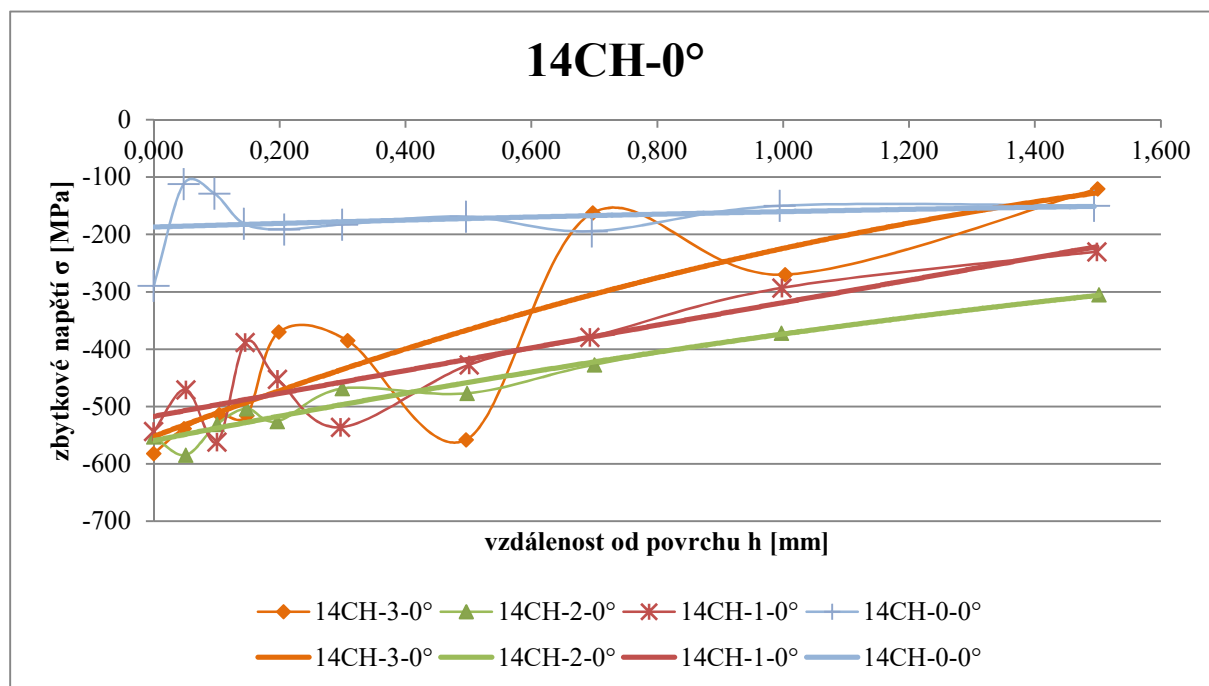


Obr. 86: Mikrostruktura 2 mm pod povrchem vzorku 14CH-3-90° (20x)

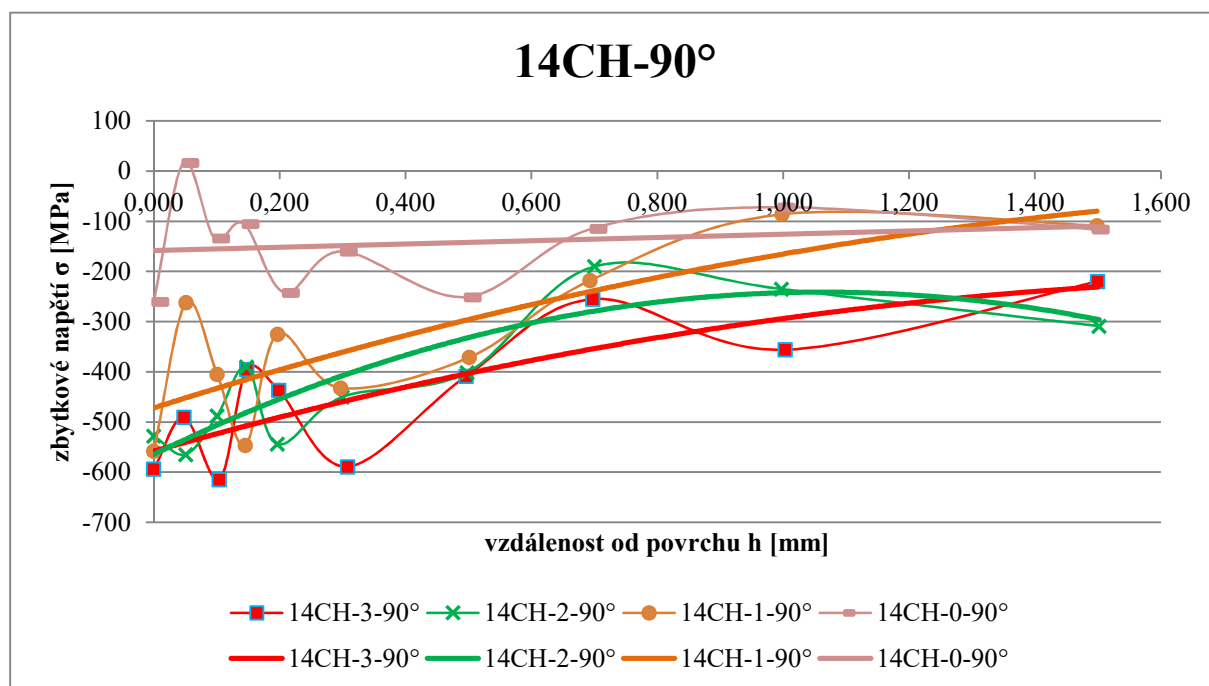
12 Diskuse výsledků

V následujících grafech (Graf 13 a Graf 14) jsou shrnuty výsledky měření zbytkových napětí u materiálu 14CH17N2.

Graf 13: Graf naměřených zbytkových napětí u materiálu 14CH17N2 ve směru 0°



Graf 14: Graf naměřených zbytkových napětí u materiálu 14CH17N2 ve směru 90°

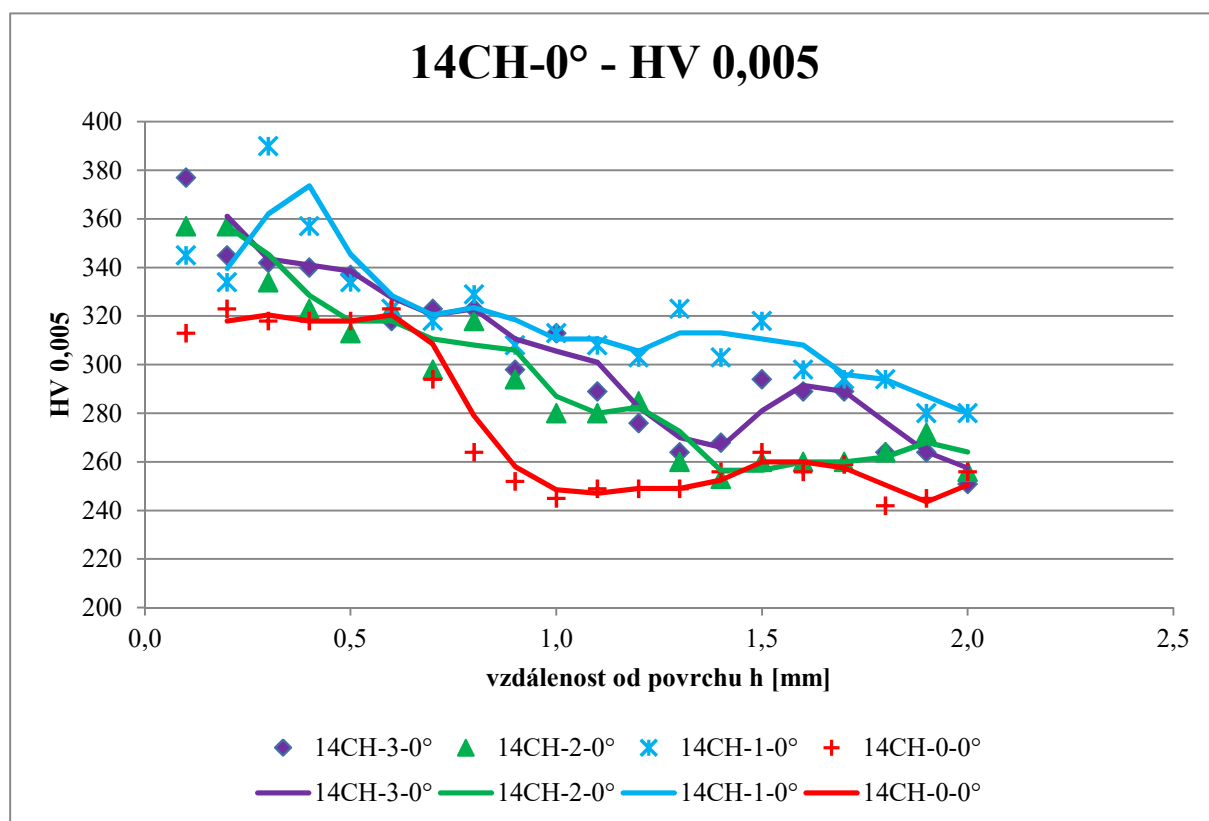


Z grafů (Graf 13 a Graf 14) je patrné, že u tohoto materiálu má největší přínos použití dvou vrstev LSP. Vzorek 14CH-2 vykazuje v obou směrech měření podobně pozvolný trend klesání napětí, navíc ve směru 0° má jeho zbytkové napětí nejvyšší hodnoty, ve směru 90° má o něco vyšší napětí vzorek 14CH-3. Trendy napětí u vzorků 14CH-1-0°, 14CH-2-90° a 14CH-3-90° jsou si velmi podobné. Nejnižší hodnoty zbytkového napětí ze vzorků ošetřených LSP vykazuje vzorek 14CH-1-90°.

V následujících grafech (Graf 15 a Graf 16) je zanesena mikrotvrdość HV 0,005 v závislosti na hloubce materiálu. Je evidentní, že tvrdost není úměrná počtu vrstev LSP a není zde zřejmá ani přímá závislost se zbytkovým napětím, což je patrné i z Graf 17, kde jsou porovnány průběhy obou veličin v absolutní hodnotě.

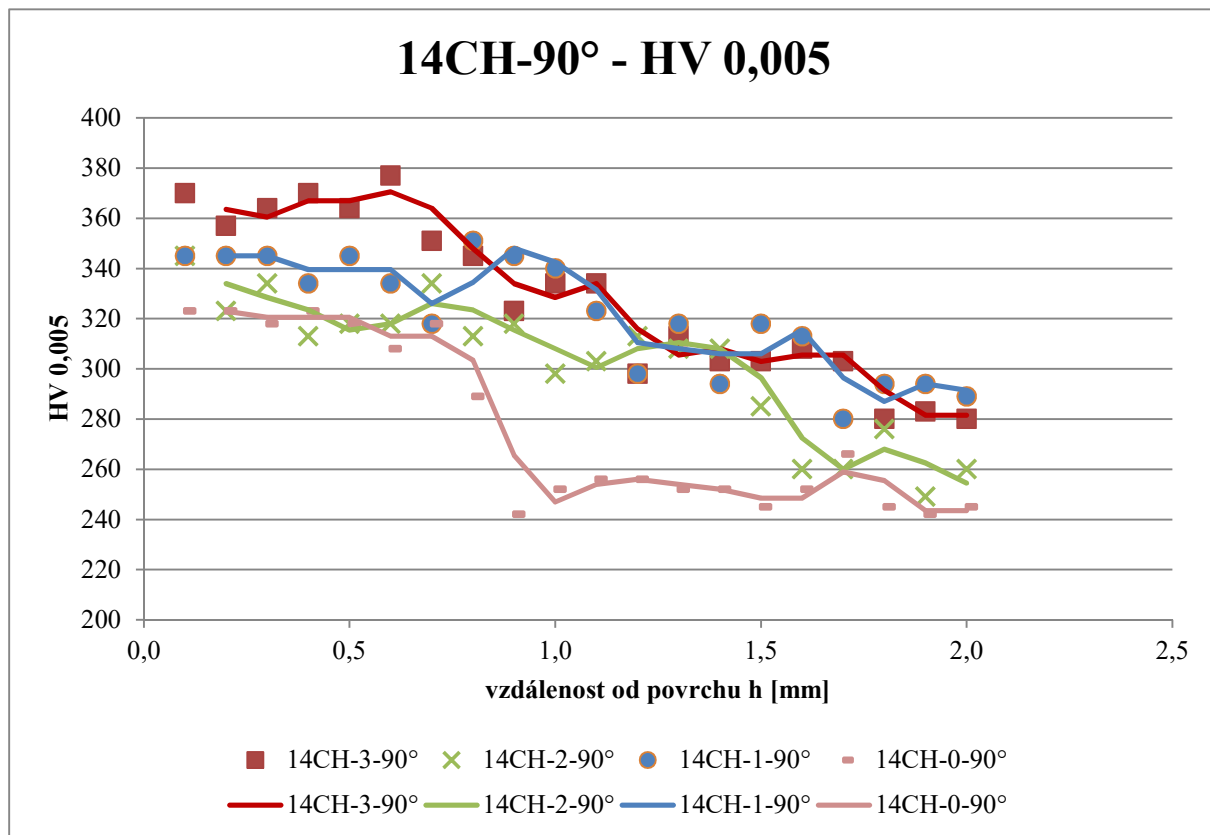
Nejvyšší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u vzorku 14CH-1-0°, nejnižší pak mimo broušeného vzorku 14CH-0-0°, u vzorku 14CH-2-0°, viz Graf 15.

Graf 15: Průběh tvrdostí u materiálu 14CH17N2 ve směru 0°

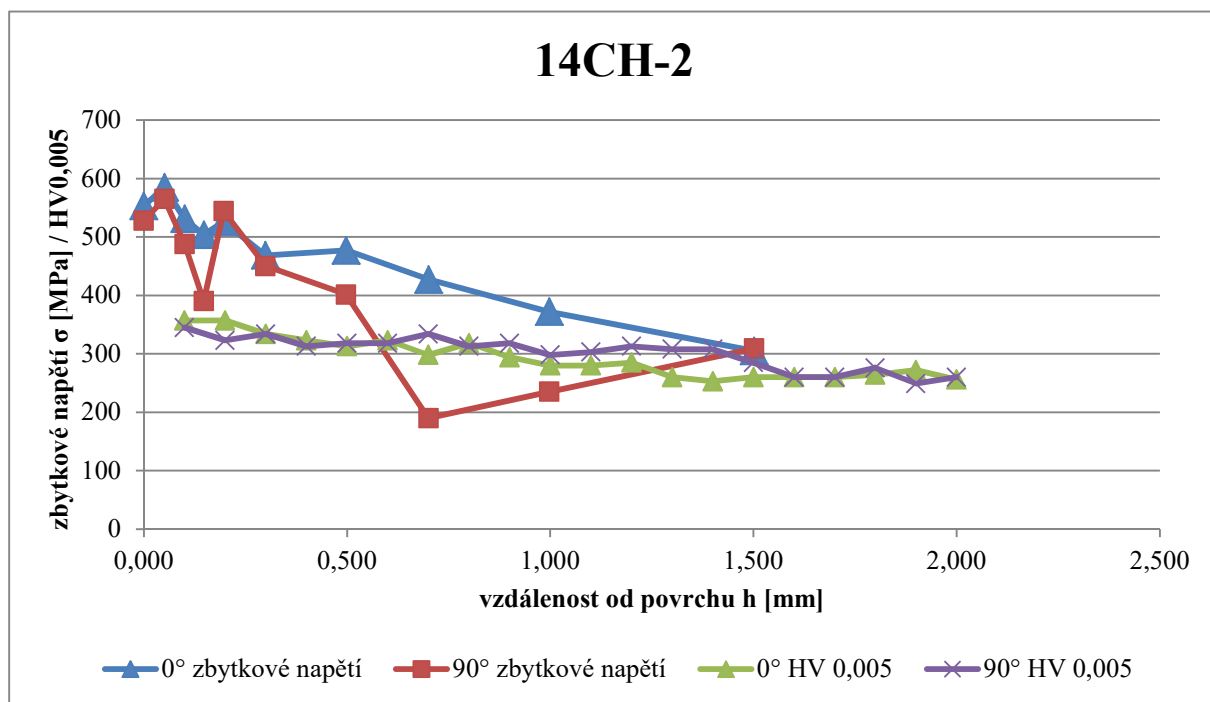


Z příčných výbrusů byly nejvyšší tvrdosti naměřeny u vzorku 14-3-90° a nejnižší u vzorku 14CH-2-90°, viz Graf 16.

Graf 16: Průběh tvrdostí u materiálu 14CH17N2 ve směru 90°

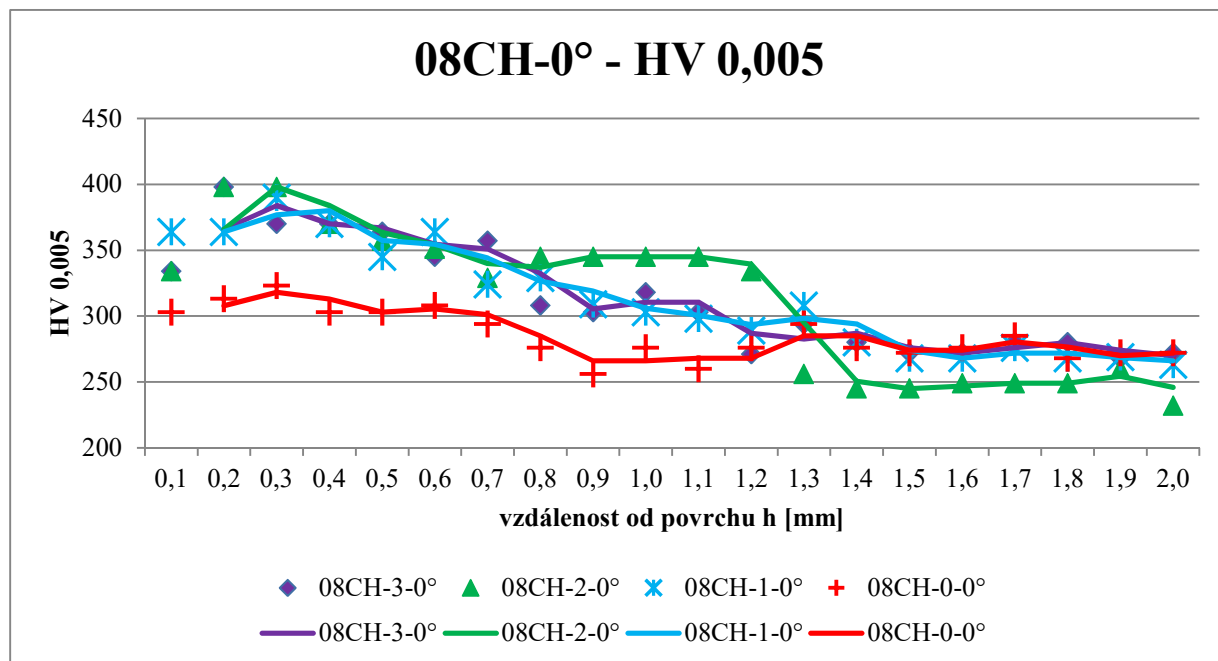


Graf 17: Porovnání průběhu zbytkového napětí a mikrotvrdosti u vzorku 14CH-2

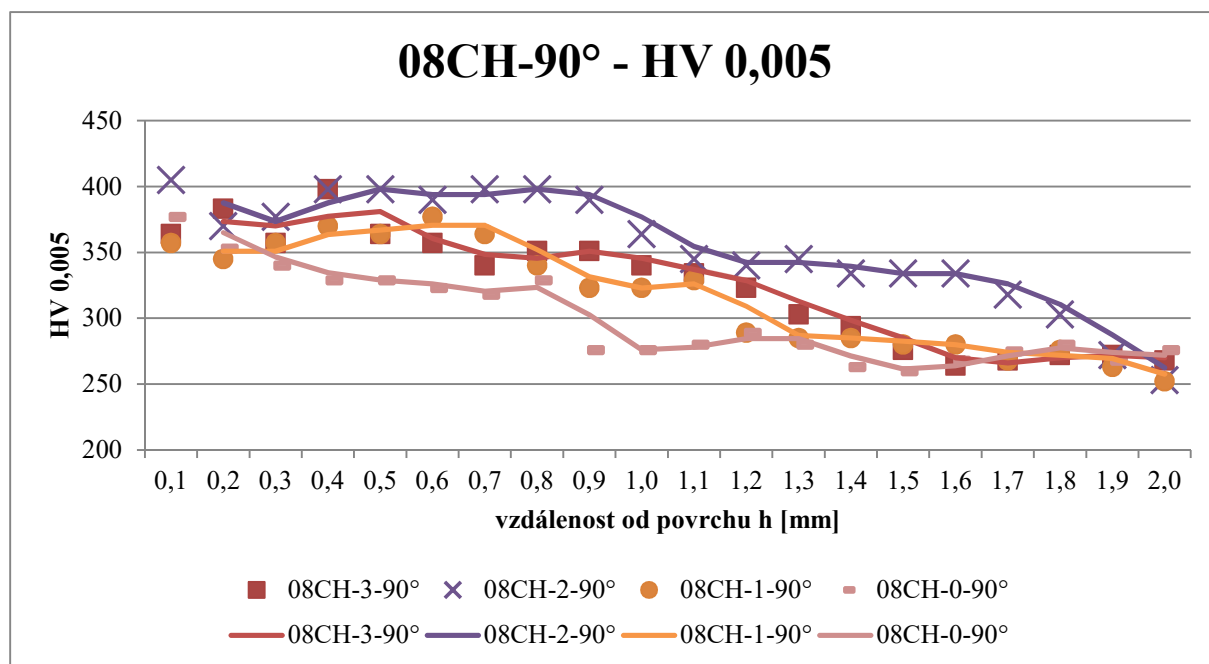


V Graf 18 a Graf 19 jsou zaneseny průběhy mikrotvrdomosti u materiálu 08CH18N10T. Podobně jako u materiálu 14CH17N2 ani zde tvrdost přímo nesouvisí s počtem vrstev LSP. Ve směru 0° jsou průběhy tvrdostí pod povrchem u vzorků s LSP vrstvami podobné. Ve směru 90° byly u vzorku se dvěma vrstvami naměřeny o něco větší hodnoty než u vzorků s jednou resp. třemi vrstvami, které jsou si z pohledu tvrdosti podobné.

Graf 18: Průběh tvrdostí u materiálu 08CH18N10T ve směru 0°



Graf 19: Průběh tvrdostí u materiálu 08CH18N10T ve směru 90°



Z hlediska jakosti povrchu Ra byly u materiálu 14CH17N2 s vrstvami LSP naměřeny nižší hodnoty podélné a plošné drsnosti než u vzorku broušeného, v případě příčné drsnosti došlo ke zlepšení jen u vzorku 14CH-2. Přesné hodnoty shrnuje Tab. 21 na straně 58. U vzorku 14CH-1 a 14CH-3 došlo oproti broušenému povrchu k poklesu o 0,12 resp. 0,14 μm ve směru 0° . Ve směru 90° se u obou vzorků drsnost nepatrně zhoršila. U vzorku se dvěma vrstvami došlo k poklesu v obou směrech. Ve směru 0° to bylo o 0,20 μm na 0,25 μm a ve směru 90° o 0,11 μm na 0,54 μm . Plošná drsnost se zlepšila o 13 μm u vzorku 14CH-1 a 14CH-2 a o 12 μm u vzorku 14CH-3.

U materiálu 08CH18N10T došlo také ke zlepšení jakosti povrchu Ra, jak zachycuje Tab. 20 na straně 57. U tohoto vzorku došlo ke zlepšení podélné lineární drsnosti o cca 0,15 μm a u příčné a plošné o 0,2 μm .

Hodnota Ra po aplikaci technologie LSP na povrch materiálu závisí na parametrech a průběhu technologie. Hodnotu Ra bude nejvíce ovlivňovat nastavené překrytí spotů a řad.

Závěr

Cílem této práce bylo ověřit základní vlivy technologie LSP na materiál a jeho vlastnosti. Experiment probíhal na materiálech 08CH18N10T a 14CH17N2, které jsou využívány v jaderné energetice.

V úvodu práce jsou popsány principy technologie, její využití a změny, které vyvolává v materiálu, jak z hlediska mechanických vlastností, tak mikrostrukturních změn. Dále jsou popsány základní metody měření zbytkových napětí a finanční náročnost technologie.

V praktické části práce dochází k ověření informací nabytých v úvodní části. Jsou zkoumány změny vyvolané v materiálu a na jeho povrchu.

Hlavním bodem experimentu bylo měření zbytkových napětí pomocí rentgenové tenzometrie. U materiálu 08CH18N10T bohužel toto měření neproběhlo z důvodů, které jsou popsány v textu práce. U materiálu 14CH17N2 bylo prokázáno zvýšení hodnoty tlakového zbytkového napětí po aplikaci technologie LSP v jedné, dvou a třech vrstvách. Pro tento materiál a dané parametry se jako nejvhodnější jeví varianta dvou vrstev. Naměřená napětí mají pozvolna klesající průběh, což je velmi výhodné z hlediska vzniku porušení materiálu. Tlakové napětí bylo měřeno až do hloubky 1,5 mm od povrchu a pravděpodobně zasahuje ještě hlouběji. Právě průběh a hloubka, do které zasahuje tlakové zbytkové napětí je hlavní výhodou této technologie oproti konvenčním metodám. Zbytkové tlakové napětí s sebou přináší zlepšení únavových vlastností materiálu, protože má tendenci uzavírat možné trhliny.

Jedním z bodů bylo měření mikrotvrdomosti, které primárně sloužilo pro odhad hloubky, do které je materiál technologií LSP ovlivněn. Toto měření neprokázalo přímou souvislost mezi velikostí ani průběhem mikrotvrdomosti a zbytkového napětí pod povrchem materiálu.

Měření drsnosti povrchu Ra prokázalo, že u obou materiálů dochází ke zlepšení jakosti povrchu. Ke zlepšení došlo jak u lineární tak i plošné drsnosti.

Na snímcích mikrostruktury je viditelné, že vzorky na kterých byla aplikována technologie LSP mají pod povrchem jemnější strukturu, než v hloubce 2 mm.

V návaznosti na tuto diplomovou práci budou povrchově zpracované materiály 08CH18N10T a 14CH17N2 podrobeny dalšímu měření zbytkového napětí pomocí odvrtávací metody. Získané průběhy zbytkového napětí měřené rentgenovou tenzometrií a odvrtávací metodou budou spolu porovnány. Dále bude výzkum zaměřen na analýzu mikrostruktury, a to zejména změny velikosti zrna a orientace v povrchových a podpovrchových vrstvách a případně fázové transformace. K těmto analýzám bude použito SEM/EBSD v CV Řež. V návaznosti na tyto výsledky bude optimalizován proces LSP a bude aplikován na zkušební tělesa pro ověření zejména únavové životnosti, ale také statických vlastností, jako jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost. Na základě těchto zkoušek budou optimalizovány parametry LSP pro aplikaci na reálné strojní komponenty z těchto materiálů.

Zdroje

- [1] GUO, Y.B. Laser Shock Peening: Modeling, Simulations, and Applications. University of Alabama. 2011, 10.5772/13094.
- [2] CLAURER, A.H, Gregory, J.K., Rack, H.J, and Eylon, D(eds). *Laser shock peening for fatigue resistance. Proceedings of Surface Performance of Titanium*. TMS, Warrendale, PA. Metal Society of AIME,217-30
- [3] Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement (MRP-267, Revision 2), EPRI Project, July 2016
- [4] MAAWAD, E, Brokmeier H, Wagner L, Sano Y & Genzel C, *Surf. Coat. Technol.* 205, p 3644-3650 (2011)
- [5] IRIZALP, S. G., N. Saklakoglu, *Peening of Metallic Materials*. Material Science and Materials Engineering. 2017, 408-440
- [6] ROBERT, P., Tata, P. E. *Shot Peening Technology*. Continuing Education and Development, Inc. 2008, T02-008
- [7] PREVEY, S., Overview of Low Plasticity Burnishing for Mitigation of Fatigue Damage Mechanisms. Paul & Jayaraman, Narayanan & Cammett, John. 2005
- [8] SONATS, Empoering Technologies. Fatigue life improvement of welded structures by Ultrasonic Needle Peening. Technology Division of Europe. 2014
- [9] PANT, B. K. Studies towards development of laser peening technology for martensitic stainless steel and titanium alloys for steam turbine applications. Materials Science and Engineering: A. Volume 587. 2013, 352-358
- [10] VÁCLAVÍK, J. a kol. *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí*. ZČU v Plzni. FST. KMM. Plzeň, 2012
- [11] ODBOR Termomechaniky technologických procesů. *Termomechanika technologických procesů. Odvrtávací metoda (metoda otvoru)*. [Online] ZČU Plzeň, 2000-2015
- [12] *Hole Drilling Method for residual stresses - Residual Stress Measurement - SINT Technology* - [online]. Dostupné z: https://www.residualstressmeasurement.com/the_hole-drilling_method.html
- [13] YODA, M. *Underwater Laser Peening*. Toshiba Corporation. Japan. 2008
- [14] KRÍŽ, A., prof. Dr. Ing. IWE, *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku*, ZČU Plzeň, projekt FI-IM4/226 a SGS-2010-083 - [online]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16376/1/Kriz.pdf>

- [15] SAKRAN Hassan, Shaker & Hamzah, Mohsin & Mohammed Abed, Raad. The effect of Laser Shock Peening on Fatigue Life Using Pure Water and Hydrofluoric Acid As a Confining Layer of Al – Alloy 7075-T6. *Journal of Engineering*. 24. 207-217. (2018).
- [16] ZVU, Kovárna a.s., *Zkušební protokol / inspekční certifikát.*, 2015, 2015/462
- [17] INOX, spol. s r. o., *Nerezová ocel 1.4541*, [online], [cit 2019_05_08], Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14541.html>
- [18] BGH, Edelstahl Freilat GmbH, *Stab, rund, gedreht*, 2009, 296682
- [19] BOLZANO, *X17CrNi16-2*, [online], [cit. 2019_05_09], Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-orozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x17crni16-2-martenziticke>
- [20] BRAJER, Jan, Ing., *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu*, Praha, 2018, Teze dizertační práce, ČVUT, Fakulta strojí
- [21] KRAUS, I., Trofimov, *Rentgenová tenzometrie*, Vyd. 1., Academia Praha, 1988, 21-070-88