

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301      Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: 3911T016      Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Zpevňování kovových materiálů metodou Laser Shock Peening (LSP)

Autor:                      **Martin SKOPEC**

Vedoucí práce:        **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin SKOPEC**  
Osobní číslo: **S18N0076P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Téma práce: **Zpevňování kovových materiálů metodou Laser Shock Peening (LSP)**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Princip a využití technologie LSP
2. Mechanismus zpevňování kovů pomocí LSP
3. Limity aplikace LSP pro železné a neželezné slitiny
4. Způsoby hodnocení zbytkového napětí a mechanických vlastností zejména únavové životnosti
5. Experimentální program na vybraných materiálech
6. Diskuze výsledků
7. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

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

CHAMPAIGNE J, *History of Shot Peening Specifications*, Ninth International Conference on ShotPeening, Spring 2006

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Zbyněk Špirit**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie  
Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

L.S.

---

**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
vedoucí katedry

### **Prohlášení o autorství**

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci 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

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Skopec	<b>Jméno</b> Martin	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	„materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Beneš, Ph. D.	<b>Jméno</b> Petr	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Zpevňování kovových materiálů metodou Laser Shock Peening (LSP)		

<b>FAKULTA</b>	strojí	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	81	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	68	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	13
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Práce je zaměřena na zjištění vlivů LSP na mechanické vlastnosti vybraných materiálů, zejména na únavovou životnost. V teoretické části je provedeno seznámení se základy technologie LSP a se základními mechanickými hodnoceními, které jsou provedeny v experimentální části. Cílem této práce je určení vlivů LSP na vybrané materiály a jejich vhodnost ke zpevňování touto metodou.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Laser Shock Peening, laser, zbytkové napětí, tlakové napětí mechanické vlastnosti, zpevňování, jaderný průmysl, únavová životnost</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Skopec	<b>Name</b> Martin	
<b>FIELD OF STUDY</b>	„Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Beneš, Ph. D.	<b>Name</b> Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Strengthening of metal materials by Laser Shock Peening (LSP)		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	81	<b>TEXT PART</b>	68	<b>GRAPHICAL PART</b>	13
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This work is focused on detection of Laser shock peening on mechanical properties selected materials especially on fatigue. Theoretical part contains introduction to the basics of LSP and introductions to basic mechanical evaluations that are included in experimental part. The aim of this work is detection effects LSP on selected materials and their suitability for strengthening by this method.
<b>KEY WORDS</b>	Laser Shock Peening, laser, residual stress, compressive stress, mechanical properties, nuclear industry, fatigue, fatigue limit

## **Poděkování**

Tato práce vznikla ve spolupráci s Centrem výzkumu Řež a výzkumným ústavem HiLASE Dolní Břežany. Rád bych tímto poděkoval všem, kteří se podíleli ať už na provedení samotného peeningu, nebo na výrobě vzorků potřebných k provedení experimentálního programu. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petru Benešovi, Ph. D. a konzultantovi panu Ing. Zbyňku Špiritovi za vedení mé práce, vstřícnost, trpělivost a za poskytnuté rady.

## OBSAH

Úvod do problematiky diplomové práce .....	3
1 Princip a využití technologie LSP .....	4
1.1 Princip LSP .....	4
1.2 Využití technologie LSP .....	5
1.3 Porovnání zásadních vlastností s ostatními metodami zpevňování materiálů .....	6
1.3.1 Porovnání LSP se shot peeningem .....	6
1.3.2 Porovnání LSP s Water jet peeningem (WSP) .....	7
1.3.3 Porovnání LSP s Ultrasonic peening treatmentem (USP) .....	7
1.4 Laserové zařízení využívané metodou LSP .....	9
1.5 Budoucí a současné trendy v oblasti LSP .....	10
2 Mechanismus zpevňování kovů pomocí LSP .....	13
3 Limity aplikace LSP pro železné a neželezné slitiny .....	16
3.1 Výhody a nevýhody metody LSP .....	17
4 Způsoby hodnocení zbytkového napětí a mechanických vlastností zejména únavové životnosti .....	18
4.1 Zbytková napětí .....	18
4.1.1 Způsoby měření zbytkového napětí .....	19
4.2 Únava materiálu .....	22
4.2.1 Zkoušky únavy .....	22
4.2.2 Charakteristické výstupy zkoušek únavové životnosti .....	23
5 Úvod do experimentálního programu .....	25
6 Použité materiály .....	26
6.1 14CH17N2 .....	26
6.2 08CH18N10T .....	26
6.3 T552 .....	27
7 Statická zkouška tahem .....	28
7.1 Výsledky materiálu 14CH17N2 .....	29
7.2 Výsledky materiálu 08CH18N10T .....	30
7.3 Výsledky materiálu T552 .....	32
7.4 Závěr z měření .....	33
8 Fraktografie .....	34
8.1 Lomová plocha materiálu 14CH17N2 .....	34
8.2 Lomová plocha materiálu 08CH18N10T .....	36
8.3 Lomová plocha materiálu T552 .....	38
8.4 Závěr z měření .....	39
9 Zkouška únavové životnosti .....	40
9.1 Únavová životnost materiálu 14CH17N2 .....	41
9.2 Únavová životnost materiálu 08CH18N10T .....	44
9.3 Závěr z měření .....	46
10 Měření zbytkového napětí .....	47
10.1 Výsledky materiálu 14CH17N2 .....	48
10.2 Výsledky materiálu 08CH18N10T .....	49
10.3 Výsledky materiálu T552 .....	50
10.4 Závěr z měření .....	50



11	Měření mikrotvrdosti .....	51
11.1	Výsledky materiálu 14CH17N2 .....	52
11.2	Výsledky materiálu 08CH18N10T .....	53
11.3	Výsledky materiálu T552 .....	55
11.4	Závěr z měření.....	56
12	Mikrostruktura.....	57
12.1	Mikrostruktura oceli 14CH17N2 .....	57
12.2	Mikrostruktura oceli 08CH18N10T .....	58
12.3	Mikrostruktura oceli T552 .....	59
12.4	Závěr z měření.....	59
13	Diskuse výsledků .....	60
14	Závěr .....	65
	Zdroje .....	67

## Úvod do problematiky diplomové práce

V novodobé technické praxi má použití laseru velmi široké zastoupení, ať už se jedná o řezání, tepelné zpracování, spojování materiálů pomocí laserového svařování nebo vytváření nové povrchové vrstvy laserovým navařováním. Novým trendem v aplikaci laseru je snaha o úpravu mechanických vlastností. Tato metoda se nazývá Laser Shock Peening (LSP). Laser při dopadu na materiál vytváří tlakovou vlnu, která vnáší do podpovrchové vrstvy tlakové napětí a tím dochází ke zpevnění materiálu bez tepelného ovlivnění výchozího materiálu, za předpokladu použití ablační vrstvy.

Tato diplomová práce slouží k představení a přiblížení technologie Laser Shock Peening a jejích vlivů na mechanické vlastnosti materiálů používaných v jaderném průmyslu, zejména vliv na únavu materiálu.

První část práce bude zaměřena na samotné základy technologie LSP, představení jejích principů funkčnosti, obecného využití a shrnutí výhod a nevýhod v porovnání s ostatními metodami zpevnování kovových materiálů. Následně budou popsány mechanismy zpevnování kovů, které jsou vyvolány použitím LSP a v návaznosti na to limity samotné aplikace pro železné a neželezné slitiny. V poslední části teoretické rešerše budou čtenáři přiblíženy způsoby hodnocení zbytkového napětí a mechanických vlastností, s hlavním zaměřením na únavovou životnost, neboť v aplikaci jaderného průmyslu hraje únavu materiálu jednu z hlavních rolí.

Druhá část práce neboli část praktická, je zaměřena na ověření základních vlivů LSP na mechanické vlastnosti, zejména na únavovou životnost. Pro experiment byly vybrány dvě slitiny, které mají velké zastoupení v jaderném průmyslu a slitina, která se konvenčně používá pro výrobu lopatek elektráren. U každé slitiny bude jedna sada vzorků laserově zpracována a bude provedeno porovnání mechanických vlastností mezi zpevněnými a nezpevněnými vzorky.

# 1 Princip a využití technologie LSP

Zpevňování kovových materiálů pomocí technologie LSP je poměrně nová a rapidně se rozvíjející technologie ovlivňování mechanických vlastností povrchové vrstvy kovových materiálů. Vlastnosti povrchové a podpovrchové vrstvy významně ovlivňují vlastnosti materiálu jako celku, neboť se mohou nacházet v povrchové vrstvě různé trhliny, vady a nedokonalosti, které z velké míry iniciují lom a následné snížení mechanických vlastností dané součásti. V nežádoucích případech může dojít až ke kritické situaci, tedy k mechanické poruše součásti, tomuto následku má technologie LSP předejít. Aplikace LSP, potažmo zvýšení zbytkového napětí má rozhodující vliv na několik vlastností materiálu. Zvyšování zbytkového tlakového napětí ovlivňuje materiál z mechanického hlediska zvýšením tvrdosti, pevnosti a větší únavové životnosti. Dalším prokazatelným vlivem je zvýšení korozní odolnosti, zejména korozního praskání pod napětím. V technické praxi, speciálně v jaderném průmyslu, je velmi stěžejní korozní odolnost a problematika únavy materiálu, tato problematika bude podrobněji popsána v kapitole 4.2.

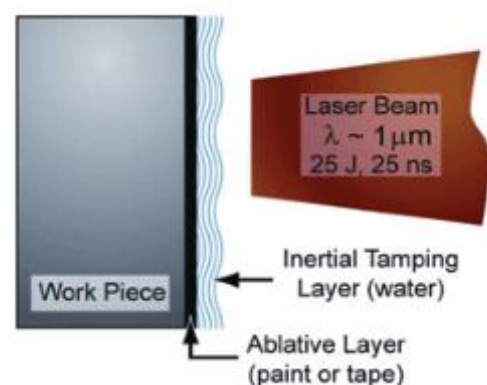
Hlavní rolí v technologii LSP pro zpevňování materiálu hraje velikost zbytkového napětí, které je touto technologií úmyslně ovlivňováno. Zbytkové napětí je obsaženo v materiálu už z výroby a snaha metody LSP je jeho ovlivnění v povrchové a podpovrchové vrstvě. Velikost vneseného napětí je závislá na parametrech laseru, na jeho intenzitě a doby trvání pulzu.

## 1.1 Princip LSP

Zpevňování materiálu metodou LSP se řadí mezi mechanické metody zpevňování kovových materiálů prováděné za pokojové teploty. Pro samotný proces zpevňování se využívají speciální pulzní lasery, které generují pulzy o délce trvání pulzu mezi 10–30 [ns] [39]. Bližší seznámení s lasery využívající se v LSP bude provedeno v kapitole 1.4. Pulzy dopadnou na povrch materiálu s intenzitou energie v řádu GPa a tato energie má za následek vyvolání plastické deformace povrchu a tlakového napětí, které se šíří ve vlnách pod povrch materiálu. Toto tlakové napětí je největší na povrchu a klesá s rostoucí hloubkou pronikání do materiálu [1].

Povrch vzorku je pokryt absorpční vrstvou, která může být tvořena z hliníku, olova, zinku, nebo může být tvořena pouze z černé barvy. Nejčastěji se pro krycí vrstvu používají PVC pásky. Tato krycí vrstva má za úkol chránit materiál od tepelných vlivů a zajišťuje určitou kvalitu povrchu. Při dopadu laserového pulzu dojde k odpaření této vrstvy a vzniku plazmy, která vyvolá samotné tlakové pulzy, které se dále šíří do materiálu [1]. Použití absorpční vrstvy není pro LSP podmínkou, existují některé aplikace, při kterých není absorpční vrstva využívána.

Do procesu je zařazena další vrstva, takzvaná vrstva transparentní. Transparentní vrstva má za úkol usměrnit tlak plazmy do materiálu a zabránit dalšímu nežádoucímu šíření do okolí. Transparentní vrstva nesmí změnit parametry procházejícího paprsku. Dalším úkolem transparentní vrstvy je zachycení výparů krycí vrstvy, omezení teplotních účinků a zabránění šíření plazmy. Tyto vrstvy jsou nejčastěji tvořeny proudem vody,

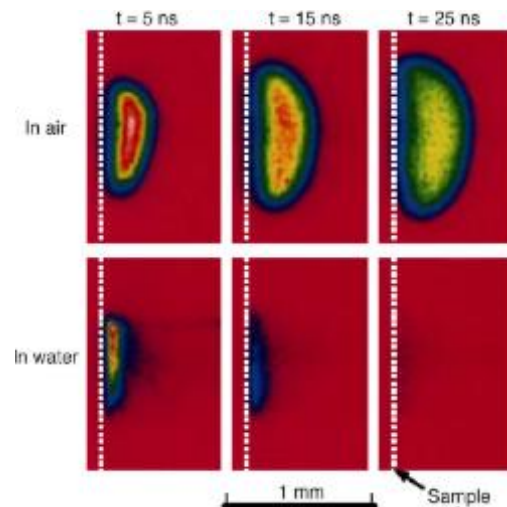


Obr. 1 – Schéma LSP [2].

kteřá je konzistentně přiváděna na místo, které je touto technologií upravované. Dalším typem materiálu transparentní vrstvy je speciální sklo. Toto sklo musí vydržet tlak vyvolaný vznikem plazmy, aniž by došlo k jeho porušení, neboť v tomto případě by docházelo k interferencím a odklonu paprsku při dopadu na takto porušenou transparentní vrstvu [2]. Na obr.1 je znázorněno schéma technologie LSP.

Význam transparentní vrstvy je patrný z obr. 2. Na tomto obrázku je pozorován rozdíl ve vzniku a šíření plazmy při použití transparentní vrstvy – vody a bez použití transparentní vrstvy. Z obrázku je patrné, že se plazma šíří daleko méně pod vrstvou vody než na vzduchu a mnohem rychleji zaniká. Při použití transparentní vrstvy nedochází k tak velké ztrátě energie plazmy, která by se jinak bez použití této vrstvy šířila do vzduchu. Tímto je energie plazmy lépe distribuovaná do materiálu.

Zpevňování materiálů pomocí metody LSP nevyvolá účinky upravovaného materiálu, které by se daly jednotně charakterizovat. Výsledky této metody závisí na použitém materiálu, ne u každého materiálu LSP vyvolá stejné účinky a dále závisí na nastavených parametrech laserového svazku [1].



Obr. 2 - Šíření plazmy pod transparentní vrstvou a na vzduchu [5].

## 1.2 Využití technologie LSP

LSP se v moderních výzkumech aplikoval na různé spektrum materiálů. Metoda není striktně omezena na železné kovy, ale již se jí povedlo aplikovat i na neželezné kovy, jako jsou například měď a její slitiny, zinek a slitiny založené na hliníku. Vliv LSP na materiál závisí na vlastnostech daného materiálu, vedle zpevňování se prokázal vliv LSP na zvýšení korozivzdornosti a zvýšení tvrdosti [1].

LSP se z hlediska zvýšení korozivzdornosti používá zejména u nerezových ocelí, neboť ty jsou nejvíce náchylné na mezi-krytalickou korozi, kterou metoda LSP omezuje. Mezi-krytalová koroze je formou nerovnoměrného korozního napadení způsobeného zejména u korozivzdorných ocelí snížením obsahu chromu v bezprostřední blízkosti hranic zrn. Chrom se poté začne vylučovat ve formě karbidů na hranicích zrn. Oblasti ochuzené o chrom korodují rychleji. LSP mezi-krytalové korozi zabraňuje vlivem zvýšeného počtu dislokací, které jsou nahromaděné na hranicích zrn. Další vliv LSP je zmírnění náchylnosti ke koroznímu praskání. Korozivzdornost není způsobena změnou pasivity povrchu. Pasivační vrstva je vlivem dopadajícího laserového svazku a následné tlakové vlny ztenčena, ale zároveň je ztuhněna a stává se odolnější. Tlaková napětí vyvolané dopadajícím laserovým svazkem uzavírá různé mikrotrhliny a vady, které jsou na povrchu a tím zároveň zabraňuje šíření koroze dovnitř materiálu [3].

V průmyslovém odvětví se zpevňování materiálů technologií LSP používá primárně pro zvýšení únavové životnosti. Největší zastoupení nalezne v leteckém průmyslu a v energetice. Hlavním zaměřením LSP je úprava částí leteckých motorů, jako jsou např. rotory a kompresory. V energetice nalezne uplatnění pro úpravu lopatek parních turbín, nosných ložisek a ozubených kol, nebo pro samotné úpravy jaderných reaktorů [1].

Zvláštní využití technologie LSP najde v biomedicině, kde prvotní účel nebyl zpevnění materiálu, ale zvýšení korozní odolnosti bioinertních slitin hořčíku např. Mg-Ca slitin, které mají největší uplatnění v oblasti implantátů [3].

Technologii LSP lze upravovat lokalizovaná místa, bez nutnosti zakrývat oblasti, které nemají být touto technologií upravovány. Díky použití laseru, a tím jeho výhody umístění na robotickém rameni lze upravovat těžko dostupná místa, která by byla jinou technologií nemožná zpevňovat, jako jsou komplexní tvary a složitější součásti [1]. Laser Shock Peening lze aplikovat již na hotovou součást, která již byla umístěna v provozu, nebo ji lze zařadit před dokončovací operace, zejména tam kde je vizuální stránka součásti důležitá [3].

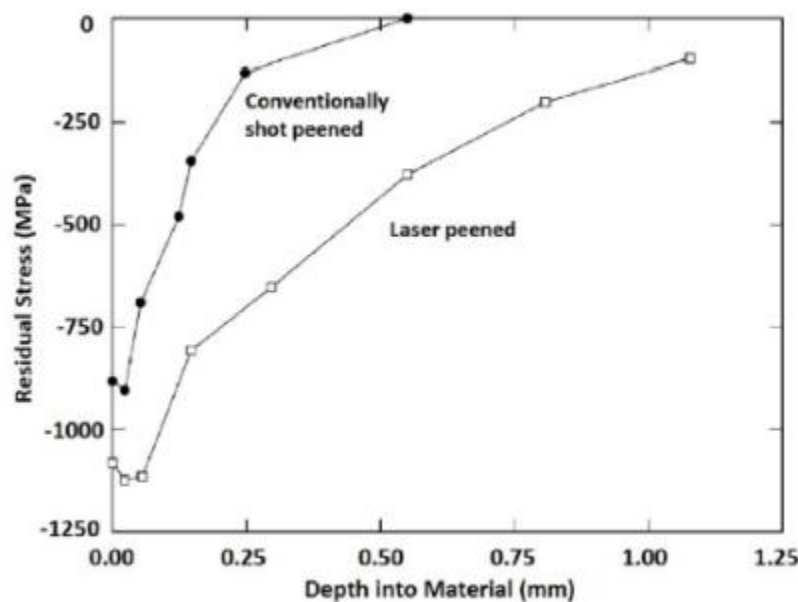
### 1.3 Porovnání zásadních vlastností s ostatními metodami zpevňování materiálů

#### 1.3.1 Porovnání LSP se shot peeningem

Při shot peeningu se na upravovaný materiál vrhají tělíska daného tvaru, které jsou nejčastěji z kovových materiálů. V místech kontaktu vržených tělísek s povrchem dojde k jeho plastické deformaci, a tím k vyvolání tlakového napětí, které se šíří dál do materiálu. Tlakové napětí je největší ve vrstvách těsně pod povrchem. Na místa, kde už došlo k plastické deformaci a ke zpevnění nemají vliv opakované nárazy tělísek [4].

Distribuce zbytkového napětí pod povrch materiálu je u metody LSP mnohem hlubší a dosahuje hodnot 0,5-1 mm, samozřejmě záleží na pracovních podmínkách a vlastnostech upravovaného materiálu. Oproti tomu se hloubka dosahu zbytkového napětí pohybuje okolo 0,25 – 0,5 mm [2].

Nevýhodou shot peeningu oproti LSP je kvalita povrchu, který je plasticky deformován a obsahuje stopy po vržených tělískách.



Obr. 3 - Porovnání hloubky zpevňování a vneseného tlakového napětí u zpevňování metodou LSP a shot peeningem [1].

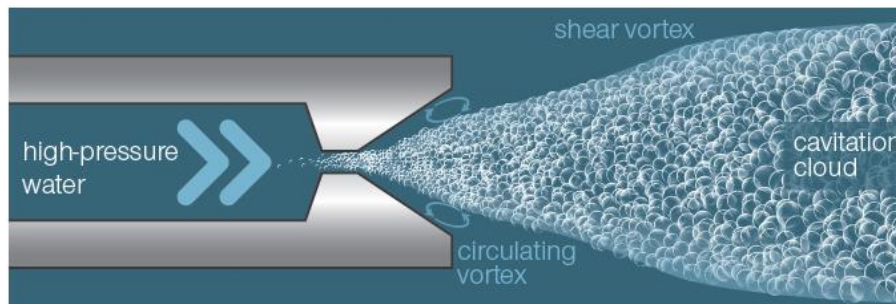
Na obr. 3 je zaznamenán rozdíl v hloubce proniknutí tlakového napětí do materiálu mezi LSP a konvenčními metodami shot peeningu. Měření bylo provedeno na materiálu inconel 718 [1].

### 1.3.2 Porovnání LSP s Water jet peeningem (WSP)

Jak metoda LSP, tak i metoda WSP fungují na principu vnášení vnějšího napětí do materiálu za normálních teplot. Na rozdíl od LSP, kdy k tomuto slouží laserové pulzy, tak u WSP se používají vysokotlaké vodní trysky, kdy voda po průchodu tryskou začne tvořit kavity. Tyto kavity jsou vysokým tlakem proudu strhávány a po dopadu na materiál se využívá kavitačního jevu, který je definovaný tlakovým koeficientem. Samotný přenos napětí do materiálu je u WSP odstartován dopadem kavity na materiál. Při styku dojde k jejímu kolapsu a v daném prostoru zaniklé kavity dojde ke skokovému nárůstu tlaku, který se dále šíří do vzorku. Tento tlak činí až 1000 MPa. Natočení trysky a vzdálenost od materiálu ovlivní velikost vnějšího napětí vnášeného do materiálu. [5].

Hlavním rozdílem mezi zpevňováním pomocí LSP a WSP je použití aditivních vrstev, které nejsou při použití WSP nutné. Dále se také jedná o metodu zpevňování za pokojových teplot, kdy nedochází k žádnému vzniku tepelných účinků v materiálu na rozdíl u LSP, kde tomu zabraňují již zmíněné aditivní vrstvy. Metodou WSP se nedosahuje takových hloubek distribuce zbytkového napětí jako úpravou pomocí LSP [5].

Obr.4 znázorňuje schéma WSP trysky a vznik kavit na výstupu.



Obr. 4 - Schéma WSP [5].

### 1.3.3 Porovnání LSP s Ultrasonic peening treatmentem (USP)

Metoda USP je jedna ze slibných metod zpevňování kovových materiálů v poslední době. Opět se jedná o úpravu kovových materiálů za studena. Metoda USP je především zaměřena na zlepšení vlastností materiálů jako jsou např. tvrdost povrchu, redukce porozity, zvýšení zbytkového napětí, anebo zlepšení kvality povrchu [6].

USP najde uplatnění v leteckém průmyslu, při úpravě součástí v lodním odvětví, v automobilu nebo ve stavebnictví, konkrétně při úpravě železných mostních konstrukcí. Nejčastěji se tato metoda používá na svařované součásti [7].

Pro zvyšování zbytkového napětí se u USP využívají vysoko-frekvenční oscilace přesahující 20 kHz s nízkou amplitudou, které procházejí několika válcovými tyčemi nebo kolíky.



Tyto kolíky se vlivem vysoké frekvence rozvibrují a při doteku ultrasonické hlavy s materiálem dochází vlivem těchto oscilací v materiálu k plastickým deformacím, a tím pádem i k zjemnění zrna a zvýšením zbytkového napětí [7].

Metoda zpevňování kovových materiálů pomocí USP má oproti metodě LSP několik výhod zahrnující vyšší produktivitu, levnější náklady, lepší kvalitu povrchu, lepší mobilitu aplikace a naprosto nulové tepelné zatížení bez použití dalších aditivních vrstev [7].

Obr. 5 znázorňuje zařízení pro zpevňování povrchu metodou USP.



Obr. 5 - Ultrasonická pistole [7].

Hloubka pronikání vnějšího napětí do materiálu je větší než hloubka pronikání vyvolaná metodou LSP. Avšak USP má velkou nevýhodu v samotné technologii zpevňování, kdy je potřeba, aby ultrasonická hlava byla stále v doteku s materiálem. Tím je způsobená nehomogenita zbytkového napětí, které může být v místech ve kterých se přerušil dotek hlavy s materiálem značně odlišné [7].

V tab.1 jsou porovnány vlastnosti jednotlivých metod zvyšování zbytkového napětí.

Porovnání vlastností metod zpevňování		
	Aditivní vrstvy	Efektivní hloubka dosahu napětí [mm]
<b>LSP</b>	ANO	0,5 - 1
<b>shot peening</b>	NE	~ 0,25
<b>WSP</b>	NE	<0,5
<b>USP</b>	NE	<1,7

Tab. 1 - Porovnání vlastností metod úprav povrchu.

## 1.4 Laserové zařízení využívané metodou LSP

Efektivita technologie LSP je závislá na vlastnostech materiálu, vlastnostech transparentní a ablační vrstvy, ale taktéž na vlastnostech a parametrech laserového paprsku. Pro potřeby LSP se používají speciální vysokoenergetické Q-switched lasery nejčastěji se jedná o lasery neodymové, Nd:glass, Nd:YAG (yttrito-hlinitý granát). Lasery, které jak již bylo zmíněno, produkují velmi krátké pulzy o trvání 10-100 [ns] s energií v rozmezí od 1 do 100 [J]. Velikostí paprsku lze ovlivnit rozsah upravovaného místa, které může být od 1 do 6 [mm] a energii vnesenou do materiálu. Dalším parametrem Q-switched laserů je tvar paprsku, který je podroben mnoha výzkumům, v dnešní době lze již využívat nejen kruhové paprsky, ale i paprsky ve tvaru čtverce nebo obdélníku. Laserový paprsek je před dopadem na materiál usměrňován skrze optické čočky a zrcadla. Q-switched laser obsahuje elektro-optický přepínač, který se stará o samotný impulz, ten může být regulován vlnovou délkou, a tím dojde i k regulaci energie, kterou pulz vyvolá svým dopadem na povrch vzorku [1].

Hustota energie vnesené do materiálu je vyjádřena jako funkce několika parametrů frekvence laserového pulzu, doby trvání výkonu a velikosti upravovaného místa [1].

Pro LSP se využívají lasery o třech vlnových délkách. První skupinou jsou infračervené lasery s vlnovou délkou 1054 [nm], které se používají v kombinaci s transparentní vrstvou ze skla. „Infračervené“ lasery nelze kombinovat s transparentní vrstvou tvořenou z vody, protože ve vodě dochází k jejich absorpci. Druhým zástupcem jsou lasery „zelené“ s vlnovou délkou 535 [nm]. Tyto lasery jsou v technologii LSP hojně využívány, neboť je voda neabsorbují, a tím nedochází ke ztrátě energie a k lomu paprsku při průchodu vodou. Poslední typem laseru využívaným metodou LSP jsou „ultrafialové“ lasery, které mají vlnovou délku 355 [nm] [1].

Volba vlnové délky závisí na vlastnostech upravovaného materiálu a požadovaných vlastnostech. Větší vlnová délka zajistí větší energii pulzu laserového svazku. Pro zajištění větší tvrdosti se použijí pulzy s větší vlnovou délkou. Dále se lasery s větší vlnovou délkou používají pro úpravu mechanicky tvrdších materiálů, jako je ocel s největším zastoupením pro nerezové oceli. Lasery s menší vlnovou délkou se nejčastěji používají pro neželezné kovy pro úpravu mědi, hliníku a bronzu. Vlnová délka také ovlivní hloubku pronikání tlakového napětí vyvolaného dopadem laserového svazku na povrch materiálu [1].

Q-Switch lasery nejsou zaměřeny čistě na použití v LSP a průmyslovém odvětví. Zvláštní aplikaci naleznou v medicíně pro odstraňování tetování a pigmentovaných lézí. V této aplikaci se nevyužívají jevy jako u LSP, nýbrž se zde využívá jevu fotoablace, kdy dochází k rozpadu pigmentů, barev na menší části, které odstraní sám imunitní systém člověka [8].

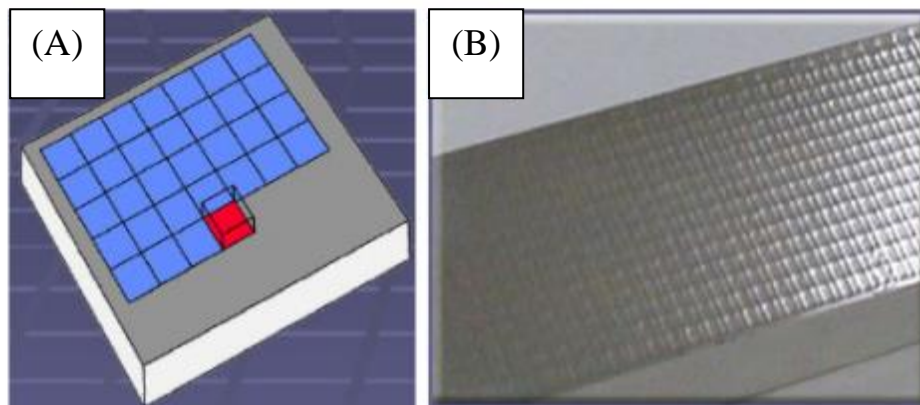


## 1.5 Budoucí a současné trendy v oblasti LSP

V současné době se metoda LSP používá na široké spektrum materiálů a součástí zahrnující buď stacionární laserový paprsek a pohyblivou součást pro součásti malých rozměrů, nebo pohyblivé laserové hlavy, přičemž součást je fixována na místě pro součásti větších rozměrů. Jako ukázkový příklad využití LSP v odvětví armádního průmyslu může být použití zpevňování rotorů motoru stíhačky F110-132–F-16 [1].

Aby se mohla zkoumat budoucnost, je nutno zaměřit se i na minulost, kdy se potenciál této metody naplno projevil v roce 1991. Společnost TOSHIBA provedla zpevňování pomocí LSP na své tlakovodní reaktory VVR. Od tohoto roku následovaly další aplikace v jaderném průmyslu [1].

Největší vývoj se očekává v oblasti použitých laserů, kdy je hlavním aspektem tohoto vývoje docílení většího napětí vneseného do materiálu za pomoci vyšší intenzity laserového pulzu. Dalším směrem vývoje v oblasti laserů je použitý tvar, v budoucnu se předpokládá průmyslové použití čtyřhranného tvaru paprsku, který oproti kruhovému tvaru docílí lepší kvality povrchu a díky tvaru dojde k lepší efektivitě rozložení po povrchu deponované součást. Vzhled deponované součásti spolu s rozmístěním paprsku je patrný na obr. 6 [1].



Obr. 6 - (A) rozmístění čtvercového paprsku, (B) vzhled deponované součásti [1].

Dalším směrem vývoje v oblasti používání LSP je zaměření na transparentní vrstvy. Některé aplikace se již dnes snaží provádět metodu LSP bez transparentní vrstvy, nebo se snaží omezit používání vody, protože v některých podmínkách je její využití značně problematické. Z tohoto důvodu se vyvíjí materiály na bázi skla, které budou mít lepší funkční vlastnosti než voda. Jako příklad vývoje vhodnější transparentní vrstvy může sloužit BK7 sklo, které má lepší rázovou impedanci než voda [2].

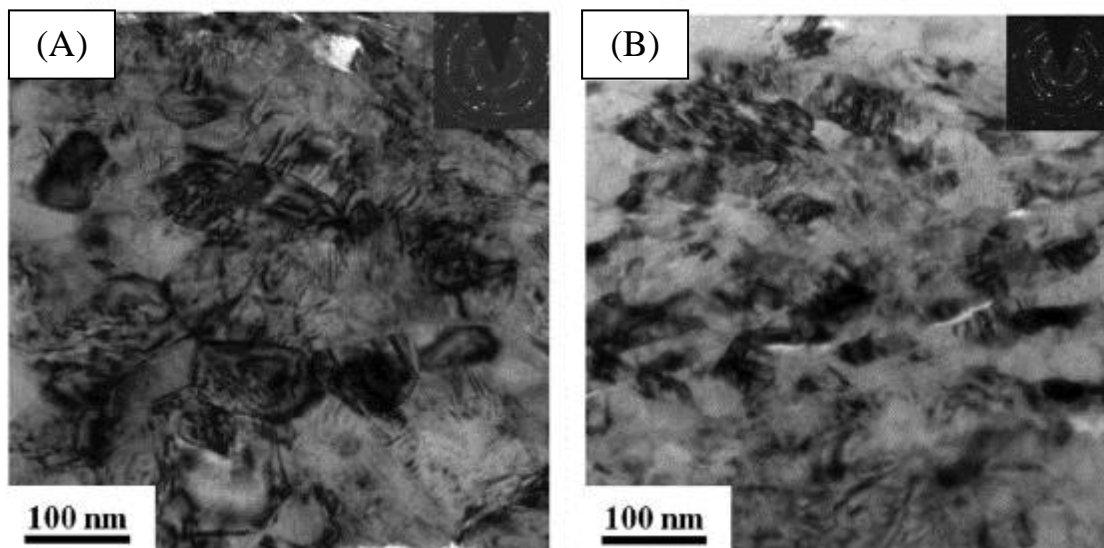
Další směr výzkumu je použití kryogenního LSP (CLSP). Samotná metoda LSP při kryogenních teplotách je prováděna za teplot kolem 77 K, tedy kolem  $-196,15^{\circ}\text{C}$ . Pozorování proběhlo na slitině mědi. Bylo prokázáno, že plastické deformace za nižších teplot, které dosahují až kryogenních teplot mají za následek nárůst tvrdosti oproti plastickým deformacím za pokojových teplot. Deformace za nižších teplot mohou zvýšit energii uloženou ve formě defektů a dislokací. Následně nižší teploty potlačují dynamické zotavení, které by nastávalo při pokojových teplotách, a tak je zlepšována pevnost materiálu.

Kryogenní teploty dále ovlivňují vznik vysoké hustoty deformovaných dvojčat. Tyto dvojčata mají dobrou tepelnou stabilitu a účinně blokují pohyb dislokačních pásů, a tím zpevňují hranice zrn [9].

Při kryogenních teplotách je potlačen dislokační skluz, tím je podporována deformace ve formě dvojčatění. Hnací síla vzniku dvojčat se s klesající teplotou zvyšuje a to zapříčiňuje vznik větších počtů dvojčat za kryogenních teplot než za pokojových teplot. Hlavní úlohu v CSLP hraje dynamické zotavení, které je vyšší než u metody LSP díky nižším teplotám, to má za následek větší deformační napětí [9].

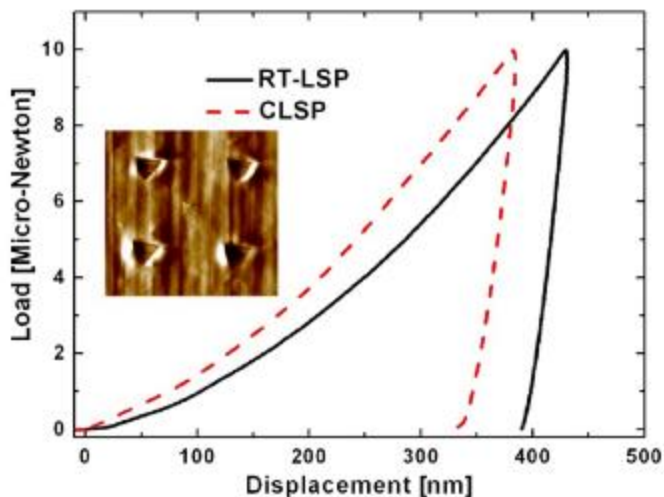
Vznik dvojčat a dislokační skluz jsou dva zásadní mechanismy pro zpevňování materiálů. Dvojčata, nejsou tak citlivá na teplotu a rychlosti deformace, zatímco dislokační skluz je velmi na teplotě závislý. Za nízkých teplot je kritické napětí potřebné pro vyvolání dislokačního skluzu velmi vysoké, to zapříčiňuje jeho omezení, takřka zastavení [9].

Porovnání mikrostruktury CSLP a LSP na měděné slitině c 99,9 % Cu je patrné na obr.7. Z tohoto obrázku je dále patrný vznik nanokrystalické struktury [9].



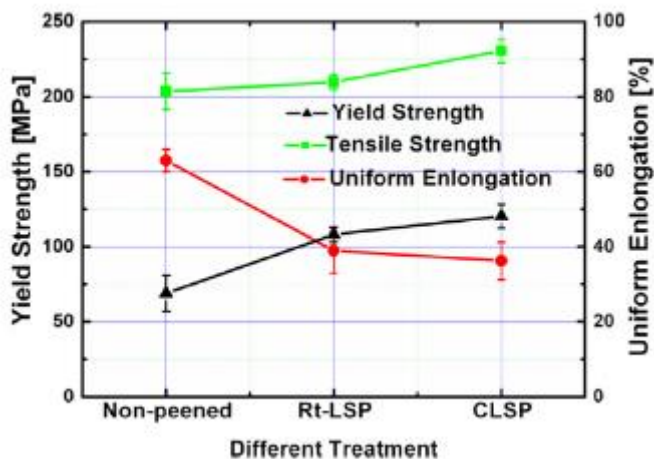
Obr.7 - Porovnání mikrostruktury mědi po technologii LSP (A) a CSLP (B) [9].

Mechanické vlastnosti zejména tvrdost, která byla ovlivněna metodou CSLP byla pozorována pomocí zkoušky nano tvrdosti. Vzorek za kryogenních teplot vykazoval větší tvrdost než vzorek upravovaný metodou LSP za pokojových teplot. Toto porovnání je patrné z obr. 8. Na tomto obrázku je znázorněna závislost přemístění hmoty (výtlaku) na zatížení [9].



Obr. 8 - Závislost zatížení při měření nanotvrdosti [9].

Pomocí CSLP je dosaženo velmi dobré pevnosti a dobré tepelné stability. Tyto účinky jsou způsobeny vysokou tvrdostí materiálu. Dále experiment ukázal, že zvýšení pevnosti materiálu během CSLP nebylo doprovázeno znatelným zhoršením tažnosti. Porovnání tažnosti, meze kluzu a pevnosti v tahu je zobrazeno v grafu na obr. 9. Z tohoto grafu je patrný markantní nárůst meze kluzu při metodě CSLP oproti LSP za normálních teplot



Obr.9 - Porovnání mechanických vlastností metod CSLP, LSP a žádné úpravy [9].

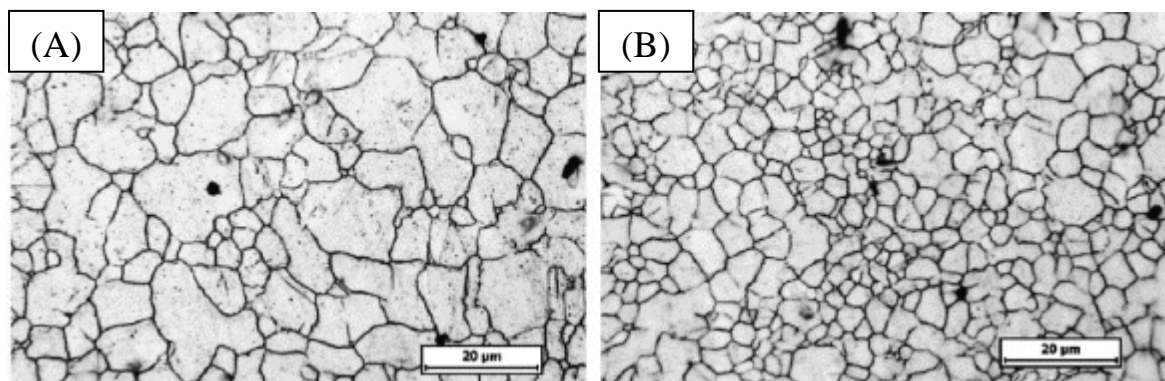
## 2 Mechanismus zpevňování kovů pomocí LSP

Pokud vrchol napětí produkovaného pulzu leží nad mezí kluzu materiálu, dojde důsledkem dopadu pulzu na materiál k jeho plastické deformaci. Jak se napětí šíří do materiálu snižuje se jeho vrchol, ale plastická deformace materiálu stále pokračuje, až do chvíle, kdy vrchol vneseného napětí nespadne pod mez kluzu, poté dojde k úplnému zastavení plastické deformace. Na obr. 10 je patrný efekt laserového pulzu na rozhraní materiál-krycí vrstva [2].

Plastická deformace a vnitřní napětí mají v materiálu prokazatelně několik důsledků. Již zmíněné zvýšení zbytkového napětí, tento efekt je jeden z nejužitečnějších, který vzniká při aplikaci LSP, avšak není jediný. Dalšími podstatnými efekty mohou být například zvýšení tvrdosti materiál, nebo větší korozní odolnost [2].

Základním mechanismem zpevňování kovových materiálů je docílení jemnozrnnosti struktury u povrchu, neboť jemnozrnná struktura má za důsledek zvýšení hustoty dislokací a plošných poruch. V jemnozrnné struktuře je obsažen větší počet hranic zrn. Hranice zrn fungují jako překážky v pohybu dislokací a zároveň zde bude jejich vysoká hustota a tím roste energie potřebná k překonání nahromaděných dislokací. Tento jev má za důsledek zvýšení pevnosti, zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy a zlepšení plastických vlastností daného materiálu, tzn. zvyšování meze kluzu [10].

Na obr. 11 je patrný rozdíl ve velikostech zrna před provedením metody LSP (obr. 11A) a po jejím provedení (obr. 11B). Pozorování bylo provedeno na materiálu AZ31B, jedná se o slitinu hořčíku, pomocí SEM mikroskopu [1].



Obr. 11 - Mikrostruktura materiálu AZ31B, (A) před provedením LSP, (B) po provedení LSP [1].

Docílení jemnozrnnosti struktury neboli zjemnění zrna se rozděluje do několika fází [10]:

- **Fáze 1**

Tvorba dislokačních pásů a pohyb jednotlivých dislokací v původních zrnech materiálu. Tento mechanismus se děje vlivem dopadajícího laserového svazku, následným vznikem plazmy a šířením vzniklého tlakového napětí materiálem.

- **Fáze 2**

Dochází k nárůstu tlakového napětí a ke zvyšování stupně deformace vlivem opakované plastické deformace. Vzniká vysoká koncentrace dislokací způsobené jejich pohybem podél dislokačních rovin.

- **Fáze 3**

Rostoucí napětí zvyšuje plastickou deformaci a v následujícím kroku dochází k rozpadu původních zrn a subzrn.

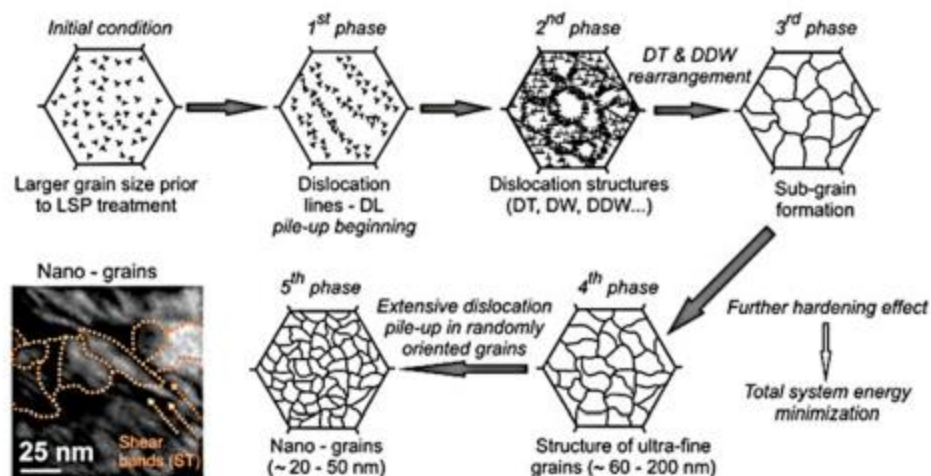
- **Fáze 4**

Vznikají smykové pásy a zanikají dislokace, tím dochází k minimalizaci energie, která vzniká opakovanými rázovými vlnami vyvolanými dopadem laserového svazku. Následně dochází k rozdělování subzrn na jemnější zrna.

- **Fáze 5**

Dochází k rozšiřování hranic subzrn vlivem nahromaděného tlakového napětí, to zapříčiňuje jemnozrnnost struktury. V konečné fázi procesu zjemňování zrna probíhá dynamická rekrystalizace, která je charakterizována jako kontinuální proces deformace a růstu nových zárodků. Vlivem dynamické rekrystalizace vzniká oblast, kde se takřka dislokace nevyskytují.

Obr.12 znázorňuje výše popsaný mechanismus zjemňování struktury.



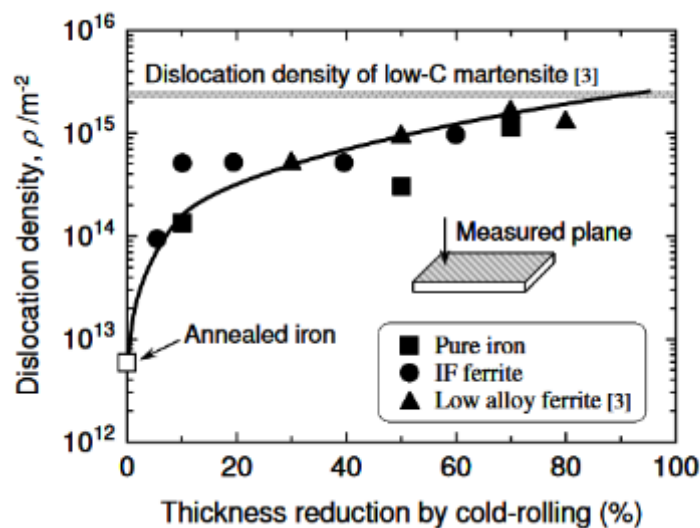
Obr.12 - Schéma zjemňování zrna [11].



Spolu s jemnozrnností struktury dochází v materiálu při zpevňování ke změně orientace krystalů, k převrácení krystalové mřížky a ke vzniku dvojčatění a jiným defektům krystalové mřížky [10].

Maximální hodnota hustoty dislokací je založena na Bailey-Hirschova vztahu. Dle tohoto vztahu lze kovy zpevňovat do nekonečna, neboť hustota dislokací stále narůstá. Avšak množství uložených dislokací má svůj limit v závislosti na odpuzivé interakci mezi dislokacemi. Nelze tedy jednoznačně určit maximální hustotu dislokací v daném materiálu, lze jen provést odhad. Například u nízkouhlíkové martenzitické oceli při zpevňování za studena (válcování) dochází k hodnotě hustoty dislokací  $2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ . Tato hodnota není však jasně považována za maximální hustotu dislokací, protože není znám limit dislokační hustoty. Na obr.13 je znázorněna hustota dislokací za studena válcovaného plechu. [12].

Maximální hustota z velké části závisí na mnoha faktorech jako je druh materiálu a jeho chemické složení a podmínkách zpevňování kovů.



Obr. 13 - Změna v hustotě dislokací za studena válcovaného plechu z nízkouhlíkové martenzitické oceli v závislosti na změně tloušťky [12].

### 3 Limity aplikace LSP pro železné a neželezné slitiny

Jak je z předchozí kapitoly patrné, tak jedním z aspektů limitace LSP je správná energie laseru vztahovaná ke konkrétnímu materiálu, tak aby tlakové napětí vyvolané jeho dopadem na materiál leželo nad dynamickou mezí kluzu. V opačném případě by nedocházelo k plastické deformaci, a tím i k žádnému šíření tlakového napětí materiálem.

U měkkých slitin jako jsou bronzy, slitiny mědi, zinku a hliníku dochází ke vzniku hlubších stop na povrchu, větší drsnost povrchu, než u tvrdších slitin. To má za důsledek ztrátu energie tlakové vlny na vytvoření tohoto reliéfu na povrchu a dochází k menším hloubkám dosahu vnášeného tlakového napětí oproti materiálům s lepšími mechanickými vlastnostmi [1].

Technologie LSP prováděná na mosazi pomocí rozdílně vysoké hustoty pulzů dokázala, že čím větší hustotu pulzů, tím větší mikrotvrdost a větší drsnost povrchu, která je způsobena většími stopami po dopadu laserového svazku. Dále byla prokázána lepší odolnost proti opotřebení. Z hlediska mikrostruktury nebyla prokázána žádná změna, byl vyvozen závěr, že zvýšení hustoty pulzů nemá za důsledek jemnozrnější strukturu. S ohledem na použití dané součásti, která je upravována metodou LSP mohou být stopy po dopadajícím laserovém svazku výhodou, zejména tam, kde zhoršený vzhled nebrání funkčnosti a vzniknuvší reliéf na povrchu je schopný zachycovat mazání a případné nečistoty, které by se jinak šířily dál [1].

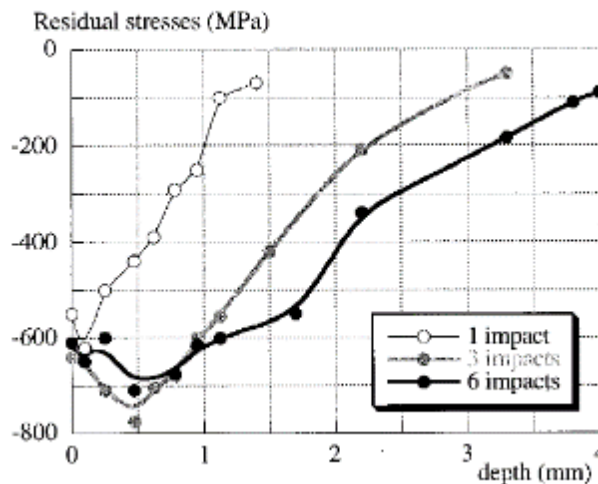
Dalším limitem, či příkladem použití LSP pro různé materiály může být použití pro titanovu slitinu Ti-17. Aplikace LSP má zásadní vliv na výsledné zbytkové napětí, které se vyskytuje v materiálu. Tvrdost slitiny je technologií LSP také zásadně ovlivněna, ale oproti tomu únavovou životnost má LSP jen malý vliv [1].

U oceli AISI 4140 (42CrMo4) byl zaznamenán zásadní vliv LSP na únavovou životnost díky větší stabilitě zbytkového napětí. Toto bylo zapříčiněno zesíleným efektem hustoty dislokací. Ostatní parametry nejeví tak markantní nárůst hodnot po provedení LSP [1].

Při použití opakované úpravy určitého místa je omezení v absorpční vrstvě, která je vlivem dopadu laserového pulzu zdegradována a je nutno ji před každou následnou vrstvou obnovit, to aplikaci prodražuje, zejména při použití jiných krycích vrstev než PVC pásky, a zvětšuje čas potřebný pro úpravu dané součásti. Dalším limitem v počtu vrstev je samotné tlakové napětí. Při určitém počtu opakování, kdy už bude kritický počet dislokací nebude dále docházet ke zpevnění a zjemnění struktury, i když se tlakové vlny budou dále šířit materiálem. Materiál dosáhne svého maximálního zpevnění a bude docházet k saturaci tlakového napětí. Z toho lze usoudit, že se zvyšujícím se počtem opakování nebude kontinuálně růst zpevnění materiálu [1].

Jak je zmíněno v předchozím odstavci, při kritické hustotě dislokací nebude dále docházet ke zpevnění a změně zbytkového napětí v povrchové vrstvě materiálu. Zároveň bude docházet při opakovaném překrývání vrstev ke zvětšování hloubky dosahu tlakového napětí. Tento jev může být takřka lineární a je výsledkem čistě elastického šíření tlakových vln v předepjatých vrstvách, které jsou již plně nasyceny dislokacemi. Na obr. 14 je patrný rozdíl mezi jednou vrstvou a více vrstvami. Dále je z obr. 14 patrné to, že počet vrstev už dále neovlivňuje změnu

zbytkového napětí neboli nedochází k dalším zpevnování. Tento jev byl pozorován na oceli 35CD4 ( 34CrMoS4) [13].



Obr.14 - Hlubkový profil zbytkového napětí po aplikaci LSP provedené v několika vrstvách na oceli 35CD4 (34CrMoS4) [13].

Z energetického hlediska jsou limity technologie závislé na materiálu upravované součásti. Pro méně ušlechtilé kovy jsou vhodné lasery s menší energií laserového pulzu. Při použití vysokoenergetického laserového pulzu by docházelo k větší drsnosti povrchu a menšímu pronikání tlakového napětí, jak již bylo zmíněno. Oproti tomu pro ušlechtilé kovy se zástupci v oblasti nerezových ocelí, titanových a wolframových slitin jsou vhodnější lasery o vysoké energii dopadajícího svazku. Použití nízkoenergetických laserů by mohlo způsobit tlakové napětí pod dynamickou mezí kluzu a tím pádem žádné plastické deformace.

### 3.1 Výhody a nevýhody metody LSP

Technologie LSP má mnoho výhod, mezi ně patří snadná obsluha a tím spojená částečná automatizace, na rozdíl od USP, kde lidský faktor hraje stěžejní roli. Mezi další výhody lze zařadit rychlost aplikace a použití na široké spektrum součástí, od malých až po součásti velkých rozměrů. Díky použití robotického ramene lze také zanedbat vnější geometrii součást, které může být takřka libovolná. Pro dutiny, nebo hluboké díry o komplikovanější topografii není LSP moc vhodná technologie, u těchto případů se využívají optická vlákna sloužící k dopravě laserového svazku ke konkrétnímu místu. Tato optická vlákna mají velké nevýhody v útlumu energie paprsku a v disperzi, kdy dochází ke zkreslení, nebo až ke zpoždění signálu. Mezi hlavní výhody zpevnování pomocí LSP patří nulový přestup tepla z laserového paprsku do materiálu, a to díky použití absorpční a transparentní vrstvy [1]. LSP lze použít na lokalizovaná místa a hloubka vniku napětí do materiálu je ze všech metod největší, dosahuje až 1 mm v závislosti na zvoleném materiálu [2].

Nevýhodou technologie LSP je vysoká pořizovací cena laserového zařízení spolu s potřebným příslušenstvím. Mezi nevýhodou lze považovat také i správnost nastavení všech parametrů, např. pokud bude mít laserový impuls malou energii a v materiálu vyvolá napětí, které bude ležet pod dynamickou mezí kluzu, nedojde k plastické deformaci [2]. Nezanedbatelný vliv na LSP má i čistota prostředí. U některých součástí lze provádět LSP opakovaně,



ale vzhledem k tomu, že se absorpční vrstva po dopadu laserového pulzu odpařuje je nutnost její obnovy před každým dalším provedením. [1].

## 4 Způsoby hodnocení zbytkového napětí a mechanických vlastností zejména únavové životnosti

### 4.1 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou mechanická napětí a existují v materiálu bez působení vnějších sil a momentů. Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických, nebo elasto-plastických deformací, které mohou být zapříčiněny již při výrobě součásti, nebo mohou vznikat při tepelném, či mechanickém zpracování. Dalším faktorem ovlivňující vznik zbytkového napětí je z velké části provozní zatěžování dané součásti [14].

Je všeobecně známo, že zbytkové napětí má velký vliv na mechanické vlastnosti a rozměrovou stálost součástí, zvláště těch součástí, která jsou namáhána únavovým namáháním [15].

Zbytkové napětí nelze z materiálu nikdy naprosto odstranit, lze jej pouze z části eliminovat a z hlediska materiálů užívaných v technické praxi neexistují žádné látky, které by neobsahovali zbytkové napětí [16].

Jako klasifikační kritérium zbytkového napětí se v polykrystalických látkách užívá velikost objemů, ve kterých zbytkové napětí nemění svou velikost ani směr, tzn. zbytkové napětí je homogenní [16]. Zbytkové napětí lze tedy rozdělit do 3. skupin:

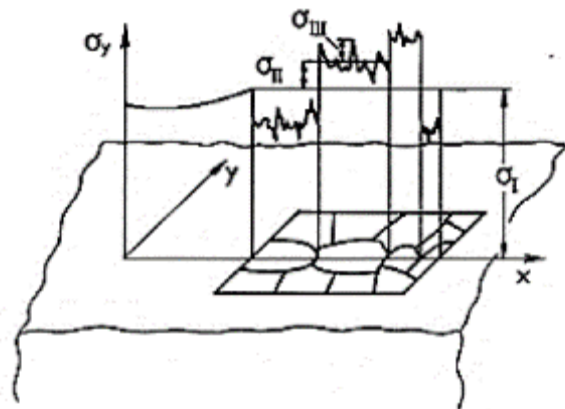
**Zbytkové napětí 1. druhu** jsou přibližně homogenní ve velké oblasti materiálu (v zrnech). Při změně silové a momentové rovnováhy dochází vždy ke změně makroskopických rozměrů [16].

**Zbytkové napětí 2. druhu** jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí krystalů. Změna silové a momentové rovnováhy nemusí vést ke změně tvaru tělesa [16].

**Zbytkové napětí 3. druhu** jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s mezi atomární vzdáleností. Změnou rovnováhy nedojde ke změně rozměrů tělesa [16].

Zbytkové napětí v určitém bodě je vždy superpozicí všech tří druhů.

Na obr. 15 je znázorněno grafické schéma rozložení zbytkového napětí všech tří druhů.



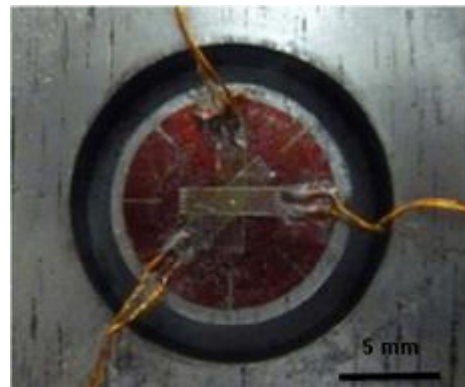
Obr. 15 - Grafické znázornění rozložení zbytkového napětí [25].

### 4.1.1 Způsoby měření zbytkového napětí

Měření zbytkového napětí se klasifikují jako destruktivní, semidestruktivní, nebo nedestruktivní. Destruktivní metody zkoumání zbytkového napětí jsou charakterizovány výrobou vzorku zvláště pro toto měření, dojde tedy k nevratnému odebrání příslušné části pro potřeby měření. Semidestruktivní zkoušky nevyžadují výrobu speciálních vzorků jen pro měření zbytkového napětí, lze tuto metodu aplikovat na všechny typy vzorků i pro jiné zkoušky, dojde však, jak už z názvu vyplývá, k částečné destrukci měřeného vzorku. Například k vyvrtání otvoru do vzorku u metody odvrtávání otvoru, nebo mezikruží. Nedestruktivní měření únavové životnosti lze používat na všechny vzorky a při tomto měření nedochází k žádnému poškození měřeného vzorku, tato metoda neovlivňuje další použití měřené součásti, lze ji tedy aplikovat na součásti v provozu.

#### 4.1.1.1 Metoda odvrtávání otvoru a mezikruží

Jedná se o metody Semi destruktivní. Princip měření zbytkového napětí u obou metod je totožný, měří se jeho relaxace po odvrtání díry, nebo mezikruží. K tomuto účelu zaznamenávání slouží tenzometry, které jsou nalepené na povrch zkoumaného vzorku. Umístění tenzometrů u metody odvrtávání mezikruží (ring-core) je znázorněno na obr.16 [15].



Obr.16 - Umístění tenzometrů pro měření metodou ring-core [15].

Metoda ring-core používá stejné základy měření jako metoda odvrtávání díry, avšak do dnešní doby neexistují unifikované standardy, které by předepisovali přesnější definici této metody, proto výzkumy určující přesný kalibrační koeficient stále probíhají. Dále není unifikována jednotná geometrie, ale většina výzkumů jako jsou např. [F. Menda, F. Trebuňa, P. Šarga, Determination of the necessary geometric parameters of the specimen in Ring-Core method, Appl. Mech. Mater., 486(2014) a M. Moazam, M. Honarpisheh, Residual stresses measurement in UIC 60 rail by ring-core method and sectioning technique, AUT J. Mech. Eng., 2(1)(2018)] používají totožnou geometrii [15].

Maximální citlivost tyto metody dosahují v intervalu 0,5 až 2 mm pod povrchem materiálu, napětí v hloubce např. 8 mm pod povrchem jsou již neměřitelná [14].

#### 4.1.1.2 Ultrazvukové metody měření

Ultrazvukové metody měření zbytkového napětí jsou založeny na vztahu mezi rychlostí šíření zvukových vln a elastických konstant materiálu. Pro měření se používají podélné, nebo příčné polarizované vlny, díky tomu lze provádět integrální měření skrz celou tloušťku vzorku. Další možností měření je použití povrchových vln, to má za následek změření zbytkového napětí těsně pod povrchem. Ultrazvukovou metodou lze také měřit rozdíl hlavních napětí, k tomu se využívá akusto-elastického dvojlomu při měření příčně polarizovaných vln na sobě dvou kolmých rovinách [14].

#### 4.1.1.3 Magnetické metody

Metody využívající odezvu materiálu na působící střídavé magnetické pole. Magneto-elastická metoda detekuje vznikající Barhausenův šum. Úroveň šumu je však funkcí jak zbytkového napětí, tak ale i mikrostruktury a tvrdosti materiálu. To má za výhodu univerzálnost použití měřícího zařízení, které se tak dá využít i ke kontrole povrchových defektů [14].

Další metodou magnetického měření je magnetostrikční metoda, které využívá měření změn magnetické indukce detekční cívkou. Měřící zařízení je nejčastěji vybaveno párem detekčních a magnetizačních cívek, toto uspořádání má za výhodu citlivou detekci rozdílu hlavních poměrných deformací [14].

#### 4.1.1.4 Rentgenová difrakční metoda

Pro rentgenové měření zbytkového napětí, neboli měření XRD se užívají jak stacionární aparatury s fotografickou detekcí záření, tak i difraktometry s paralelním svazkem. Fyzikální princip měření spočívá ve stanovení vzdálenosti určitého systému mřížkových rovin  $\{hkl\}$  v různě orientovaných krystalech. Při detekci difraktovaného záření na film dostaneme spojitě Debyeovy-Scherrerovy linie, pokud se tyto linie rozdělují na diskrétní difrakční stopy, je možno počet vhodně orientovaných krystalů zvýšit samotným pohybem vzorku, přičemž se nesmí změnit geometrické podmínky metody. Výhoda použití rentgenové difrakční metody pro měření zbytkového napětí je takřka nulová úprava povrchu vzorku [16].

Při samotném měření zbytkového napětí je elastická anizotropie respektována pomocí rentgenografických elastických konstant, které lze vypočítat teoreticky nebo je určit experimentálně na základě měření mřížkových deformací ve vzorcích vystavených známému jednoosému namáhání [16].

Rentgenová difrakční analýza má určité rysy, které jí odlišují od jiných tenzometrických metod měření zbytkového napětí [16]:

- Měření jsou omezena jen na krystalické látky, to vychází ze samotného principu difrakce
- V tenké povrchové vrstvě jsou měření zcela nedestruktivní. Ve větších hloubkách je nutno použít ke stanovení mřížkové deformace (napětí) postupné odleptání povrchu, a tím dochází k destrukci vzorku.
- Jako „měrka“ je zde použita mřížková vzdálenost, ta je o cca 8 řádů menší než „měrka“ použitá ostatními metodami.
- U měření jednofázových soustav je použití měření deformace omezeno jen na vhodně orientované krystaly.
- U vícefázových soustav lze využít selektivní vlastnosti difrakční metody a stanovit mřížkové deformace na krystalech každé fáze zvlášť.

#### 4.1.1.5 Neutronová metoda

Neutronová metoda měření zbytkového napětí je v principech aplikace podobná jako rentgenová difrakční metoda. Metoda zjišťuje zbytkové napětí na principu detekce difraktovaného záření z náhodně orientovaných meziatomárních rovin. U této metody lze detekovat zbytkové napětí do větších hloubek než u rentgenové difrakční metody. Na rozdíl od XRD metody se zde místo rentgenových svazků využívají svazky neutronové, které emitují elektromagnetické záření. Jedná se taktéž o nedestruktivní metodu zjišťování zbytkového napětí [24].

V tab. 2 níže je znázorněn přehled všech metod popsanych v této kapitole spolu s jejich charakteristickými vlastnostmi.

Metoda	Odvrtávání otvoru	ultrazvuková	magnetická	XRD	Neutronová
charakteristika	semidestruktivní	nedestruktivní	nedestruktivní	nedestruktivní	nedestruktivní
aplikovatelnost	rovinná napjatost na povrchu	rozdíl hlavních napětí	feromagnetický mat.; rovinná napjatost	izotropní mat.; homogenní mat.; polikrystalický; rovinná napjatost	izotropní mat.; homogenní mat.; polikrystalický; prostorová napjatost
Druh zjištěného zbytkového napětí	1. druhu	1., 2., 3., druhu	1., 2., 3., druhu	1., 2., 3., druhu	1., 2., 3., druhu
charakteristický paramter	povrchové deformace	změna šíření zvukových vln a el. Konstant materiálu	amplituda Barkhausenova šumu	změna meziatomových vzdáleností	změna meziatomových vzdáleností
hloubka schopnosti měření	0,02 -15 mm	integrální měření skrze celý materiál	0,1 - 1 mm	1 - 50 $\mu$ m	do 100 mm

Tab.2 - Vlastnosti vybraných metod měření zbytkového napětí [14] [24].

Jak je možné zpozorovat z tab. 2 každá metoda má své výhody a nevýhody, ať už jsou zaměřené na hloubku detekce, nebo na charakteristiku samotné metody. Pro komplexní zjištění zbytkového napětí v materiálu je vhodné využívat kombinaci metod. Měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě je vhodné zkoumat pomocí metody rentgenové difrakce XRD, která je v tomto rozmezí přesnější než metody ostatní. Pro zjištění hloubkového profilu lze použít metodu odvrtávání otvoru, která poskytne lépe interpretovatelné hodnoty dosahu zbytkového napětí, nebo metodu XRD s postupným odleptáváním povrchu, pro zjištění hloubky dosahu tlakového napětí je nutno odleptávání aplikovat v několika krocích.

## 4.2 Únava materiálu

Únava materiálu je pomalu postupující proces vzniklý opakovaným dynamickým zatěžováním, které vede k plastické deformaci, nukleaci a následnému růstu zárodků trhlin a poté až k porušení součásti pomocí únavového lomu. Ten je charakterizován svým vznikem při napětích nižších, než je mez pevnosti v tahu  $R_m$  a v mnoha případech i při napětí menším než je pevnost na mezi kluzu  $R_e$  [18].

Únava materiálu neboli únavová životnost je závislá na několika faktorech:

- Charakteristika materiálu – houževnatost, křehkost
- Mez pevnosti v tahu
- Teplota provozu součásti
- Případné tepelné zpracování součásti
- Pracovní prostředí
- Typ namáhání – rázové, míjivé, nebo náhodné
- Charakter namáhání – tah, ohyb, krut, složené namáhání
- Povrchová úprava – již dříve zmíněné metody (LSP, kuličkování), cementace, nitridace
- Tvar součásti
- Velikost provozované součásti

Únavovou životnost lze charakterizovat dle počtu dosažených cyklů, na nízko cyklovou únavu a vysoko cyklovou únavu.

### 4.2.1 Zkoušky únavy

Zkoušky únavy probíhají na principu střídavého namáhání zkušební vzorku, kdy se nejčastěji střídají tlaková a tahová namáhání. Vlivem kmitavého zatěžování se ve vzorku kumulují vady, které vedou k velkému vnitřnímu pnutí a ke vzniku mikroskopických trhlin. Trhliny dále nukleují za vzniku makroskopické trhliny, která se ve svém finálním stádiu šíří i po odlehčení napětí. Nejběžnějším výstupem únavových zkoušek je Wöhlerova křivka, která bude blíže představena v bodu 4.2.2. [18].

Únavové zkoušky se dají provádět na specializovaných zařízeních, nebo na univerzálním trhacím stroji. Další způsob provádění zkoušek je dle prostředí, lze provádět zkoušky únavové životnosti např. za zvýšené teploty, za snížené teploty, nebo v solném roztoku.

Zkoušky vysoko cyklové únavy jsou charakterizovány pomocí frekvence kmitů, které leží v rozmezí od 10 do 200 Hz. Řízený parametr je téměř vždy amplituda napětí a pro stanovení celé Wöhlerova křivky a meze únavy se nejčastěji používá 10 zkušebních tyčí [18].

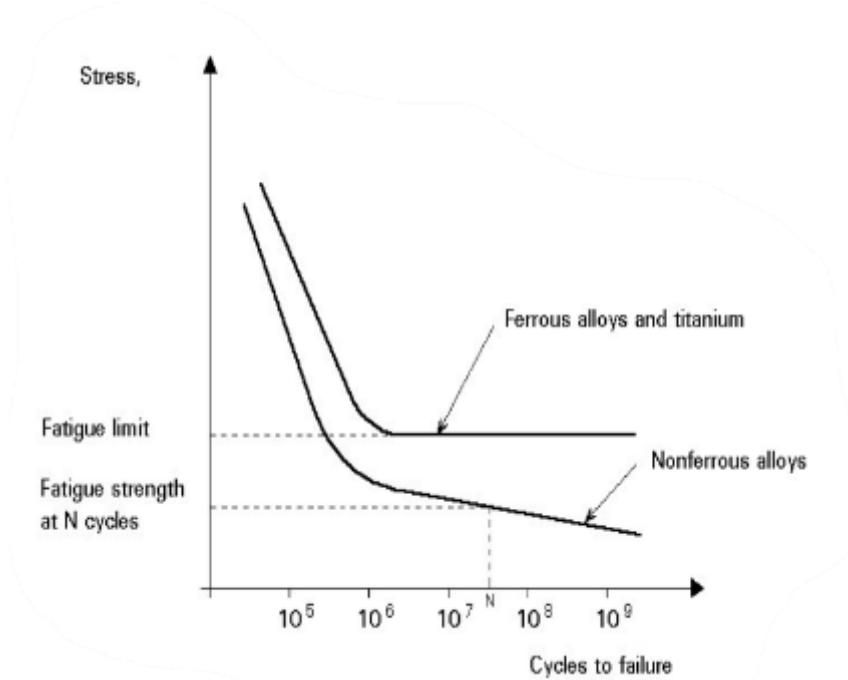
Oproti tomu při zkouškách nízko cyklové únavy je řízený parametr amplituda deformace, buď deformace celková, nebo jen její elastická složka. Nízko cyklová únava probíhá při frekvenci do 3 Hz a její výsledky se vyhodnocují pro životnost součásti od  $10^2$  až do  $10^5$  kmitů [18].

## 4.2.2 Charakteristické výstupy zkoušek únavové životnosti

### 4.2.2.1 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka je grafické znázornění amplitudy napětí na počtu cyklů, které nezohledňuje statické napětí, okolo kterého se tvoří kmity. Jelikož při samotné únavové životnosti netvoří toto statické namáhání tak potřebný význam, není nutno ho v grafu zahrnovat [18].

Na obr. 17 je znázorněno porovnání Wöhlerových křivek pro železné kovy zastoupené titanem s neželeznými slitinami.



Obr. 17 - Porovnání Wöhlerovy křivky pro železné a neželezné kovy [19].

### 4.2.2.2 Mez únavy

Mez únavy je charakterizována takovým napětím, které daný materiál teoreticky vydrží při nekonečném počtu cyklů. Avšak pro technickou praxi je nekonečno cyklů nahrazeno termínem konečný počet cyklů značený  $N_c$ , které materiál vydrží před vznikem únavového porušení. Konečný počet cyklů je odlišný pro různé materiály, pro ocel a litinu je  $N_c = 10^7$  cyklů a pro lehké kovy a jejich slitiny je hodnoty  $N_c 10^8$  cyklů [18].

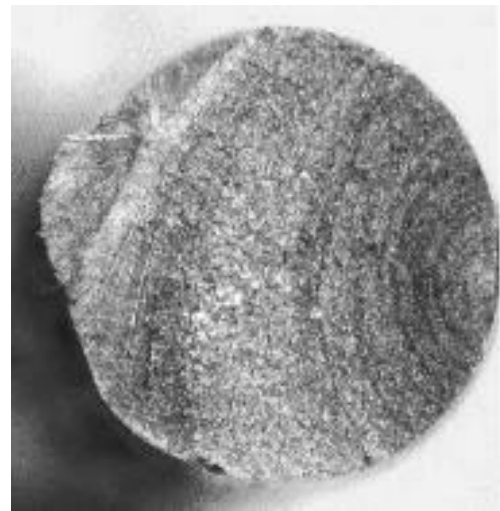
### 4.2.2.3 Únavový lom

Nejčastějším místem zrodu únavové trhliny je povrch materiálu a jeho vady. Výjimku tvoří materiály tepelně, nebo chemicky zpracované a materiály s výrazným vnitřními vadami [20].

Samotný průběh únavového porušování, potažmo vzniku únavového lomu je komplikovaný a časově náročný proces. Zprvu dochází ke změně mechanických vlastností, poté ke vzniku trhliny a následně k jejímu rozšíření skrze celou součást. V první fázi zrodu únavové trhliny hrají velkou roli rozdíly v deformačních schopnostech daného materiálu. Po dosažení určité hodnoty mezního napětí vznikají v zrnech, které jsou vhodně orientovány kluzné pásy s nadměrným výskytem dislokací. Kluzné pásy narůstají závisle na narůstajícím počtu cyklů [18].

Mechanika vzniku únavové trhliny se odvíjí od teorie, která určuje že deformace zrn je přímo úměrná zpevnění, kdy při zvyšování deformace značně roste rozdíl mezi pevnostmi různých míst. Oblasti, které mají sníženou deformační schopnost jako jsou vměstky, karbidy, hranice zrn a hranice fází mají největší pravděpodobnost k nukleaci únavové trhliny [18].

Na obr. 18 je zobrazen únavový lom s liniemi růstu trhliny a místo vzniku na povrchu vzorku.

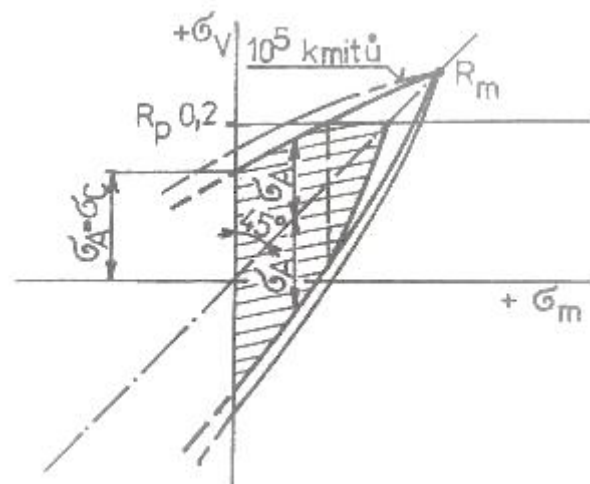


Obr. 18 - Únavový lom [21].

### 4.2.2.4 Smithův diagram

Udává názornou představu o odolnosti proti únavovému porušení při opakovaném namáhání v kombinaci se statickým předpětím. Na vodorovnou osu se ve Smithově diagramu vynáší trvalé předpětí  $\sigma_m$ , v kterém je zahrnuto i vnitřní pnutí v materiálu a na osu svislou se vynáší výsledné napětí  $\sigma_v$ , což je součet trvalých složek  $\sigma_m$  a střídavé složky, odpovídající příslušné mezi únavy [18].

Bude-li výsledný součet napětí ležet uvnitř Smithova diagramu, nedojde k porušení dané součásti. Na obr. 19 je Smithův diagram znázorněn.



Obr. 19 - Smithův diagram [18].



## 5 Úvod do experimentálního programu

V samotném experimentálním programu bude na materiálech provedeno zpevnění pomocí technologie LSP a následně bude provedeno vyhodnocování potřebných charakteristik, které budou zahrnovat měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce XRD, statickou zkoušku tahem a měření únavové životnosti. Experimentální program bude dále doplněn o základní metalografii a fraktografii lomových ploch na vzorcích z tahové zkoušky. Pozorování mikrostruktury bude prováděno za účelem ověření vlivu zpevnění materiálu na výslednou velikost zrn. Všechna měření budou vyhodnocována na vzorcích zpevněných pomocí LSP a na vzorcích nezpevněných. Dalším doplňujícím měřením, které má za úkol prokázat vliv LSP na mechanické vlastnosti v oceli, je měření mikrotvrdosti, při kterém bude zjišťován průběh tvrdosti od povrchu do hloubky vzorku. Toto měření také slouží k určení hloubky, do které LSP ovlivní základní materiál, tedy do hloubky, do které dojde u daného materiálu ke zpevnění.

Hlavním cílem experimentálního programu je ověřit platnost informací, které byly získány při kompletaci rešerše v teoretické části této práce a zhodnotit vliv LSP na materiálech, které mají zásadní užití v jaderném průmyslu.

V experimentálním programu jsou testovány tři druhy materiálů. Konkrétně ocel s označením 08CH18N10T, tedy korozivzdorná ocel dle ČSN 17 248, ocel 14CH17N2, taktéž korozivzdorná ocel dle ČSN 17 150 VN a ocel T552 dle firmy BÖHLER.

Samotná technologie LSP byla aplikována na materiály v jedné vrstvě, jako transparentní vrstva byla použita tekoucí voda a jako absorpční vrstva byla využita černá PVC páska. Aplikace byla provedena ve výzkumném ústavu HiLASE Dolní Břežany. Další parametry, kterými se aplikace LSP řídila jsou zobrazeny v tab. 3.

Parametry LSP						
vyzářená energie [J]	velikost místa aplikace [mm]	doba trvání pulzu [ns]	výkonová hustota [GW*cm <sup>-2</sup> ]	počet vrstev	počet sekvencí	překrytí [%]
<b>2,5</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>6,25</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>50</b>

Tab. 3 - Parametry aplikace LSP.



## 6 Použité materiály

Zvoleny byly tři materiály 08CH18N10T, 14CH17N2 a T552. Tyto materiály byly voleny s ohledem na použití v jaderné energetice a s předpokládaným pozitivním vlivem zpevňování pomocí LSP na mechanické vlastnosti daných ocelí.

### 6.1 14CH17N2

Ocel 14CH17N2 dle ČSN 17 150VN je martenzitická chromová ocel, která vykazuje vysokou korozivzdornost. Dále je tato ocel charakterizována velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, obrobiteľnosťou a dobrou svařitelností. Uplatnění nalezne v odvětvích, kde je třeba dosahovat vysokých pevností. Ocel 14CH17N2 se používá v petrochemickém a chemickém průmyslu, v potravinářství a v papírenském průmyslu [22].

14CH17N2 dosahuje v zušlechtěném stavu až 1050 MPa na mezi pevnosti a ve stavu normalizačně žíhaném až 950 MPa. Mez kluzu  $R_{p0,2}$  činí až 700 MPa [22].

Přehled chemického složení oceli 14CH17N2 je znázorněn v tab. 4. Tyto hodnoty jsou z TDP. Přesné chemické složení konkrétní tavby, tedy materiálové listy oceli, ze které byly pořízeny zkušební vzorky jsou přiloženy v příloze č.1.

Chemické složení oceli 14CH17N2 [hm%]												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	W	Co
0,14	0,39	0,40	0,018	0,0010	16,18	1,57	0,18	0,08	0,035	0,004	0,45	0,023

Tab.4 - Chemické složení oceli 14CH17N2 dle TDP [22].

### 6.2 08CH18N10T

Jedná se o austenitickou ocel třídy 17 dle ČSN, konkrétní ekvivalent ČSN 17 248. Ocel 08CH18N10T je korozivzdorná, která má velké zastoupení v jaderném průmyslu, v leteckém průmyslu a v aplikacích, kde je potřeby vysoké korozivzdornosti a je potřeba vysoké kontroly chemického složení. Další využití nalezne v potravinářském průmyslu a při výrobě tlakových nádob. Mezi hlavní vlastnosti oceli 08CH18N10T je dobrá svařitelnost všemi metodami. Dále velmi dobře odolává proti mezikrystalické korozi [22].

Ze všech zvolených materiálu má ocel 08CH18N10T nejmenší hodnoty pevnosti, tudíž lze předpokládat pozitivní vliv LSP na mechanické vlastnosti a výraznější zlepšení hodnot mechanických vlastností oproti ostatním ocelím.

Ocel 08CH18N10T se nejčastěji dodává ve stavu po rozpouštěcím žíhání, kdy mez pevnosti je 510 – 710 Mpa a mez kluzu  $R_{p0,2}$  je minimálně 200 Mpa. Tažnost u této oceli je minimálně 40% [22].

Přehled chemického složení oceli 08CH18N10T je znázorněn v tab. 5. Tyto hodnoty jsou z technických dodacích podmínek (TDP), přesné chemické složení konkrétní tavby, tedy materiálové listy oceli, ze které byly pořízeny zkušební vzorky jsou přiloženy v příloze č.1.

Chemické složení oceli 08CH18N10T [hm%]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
max 0,08	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0-19,0	9,00-12,0	5xC-0,7

Tab.5 - Chemické složení oceli 08CH18N10T dle TDP [22].

### 6.3 T552

Ocel od firmy BÖHLER T552 je vysoce žárupevná korozivzdorná ocel k zušlechtnění, která vykazuje dobrou houževnatost a dobrou odolnost proti tečení. Díky své teplotní hranici použití až 560 °C nalezne tato ocel uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu, například komponenty pro kompresory a lopatky. Další aplikace oceli T552 jsou strojní komponenty pro energetický průmysl. Ocel je charakterizována svou vysokou pevností. [23].

Ocel T552 dosahuje v zušlechtněném stavu meze pevnosti 930–1130 MPa a Mez pevnosti  $R_{p0,2}$  činí až 760 Mpa [22]. Další charakteristikou ocele T552 je tažnost, které je minimálně 14 % a kontrakce minimálně 40 % .

Přehled chemického složení oceli T552 je znázorněn v tab. 6. Tyto hodnoty jsou brány z norem. Přesné znění TDP je přiloženo v příloze č.1.

Chemické složení oceli T552 [hm%]									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N
0,08- 0,15	max 0,50	0,40- 0,90	max 0,025	max 0,015	11,0- 12,5	2,00- 3,00	1,50- 2,00	0,25- 0,40	0,020- 0,040

Tab.6 - Chemické složení oceli T552 dle TDP [23].

## 7 Statická zkouška tahem

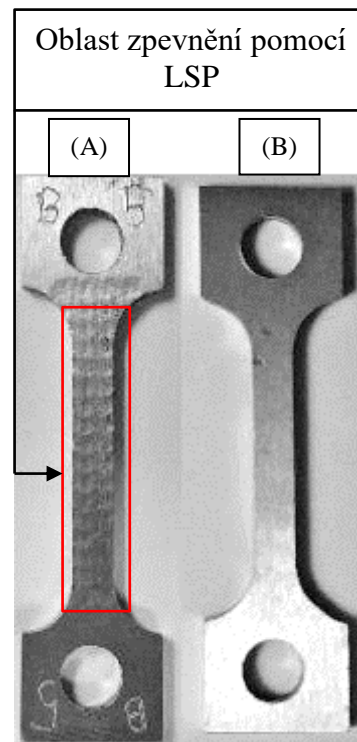
Pro zkoušku tahem byly od každého materiálu zvoleny 3 vzorky ve stavu nezpevněném a 2 vzorky ve stavu zpevněném pomocí LSP. Počet vzorků s LSP pro tahovou zkoušku byl zvolen právě dva s ohledem na náklady aplikace LSP. Následně byly vyhodnocovány hodnoty a porovnávány byly konkrétně mez pevnosti v tahu, tažnost, kontrakce a mez kluzu  $R_{p0,2}$ . V dalším kroku byla stanovena směrodatná odchylka  $\sigma$  pro oba typy vzorků, tedy pro zpevněné a nezpevněné vzorky.

Zkoušky tahem byly prováděny dle norem ČSN EN ISO 6892-1.

Vzorky bez LSP a s LSP jsou znázorněny na příslušném obr. 20. Tvar vzorků byl zvolen tak, aby byla umožněna aplikace LSP.

Základním parametrem zkušebního tělesa pro provedení statické zkoušky tahem byla šířka 4 mm a tloušťka 2 mm. Ostatní rozměry zkušebního tělesa se řídily příslušnými normami.

Označení vzorků se řídí dle tab.7.



Obr. 20 - Vzorek pro tahovou zkoušku (A) s LSP a (B) bez LSP.

Označení vzorku	Zpevněno	Značení dle GOST	Označení EN
A1	NE	14CH17N2	X17CrNi16-2
A2	NE	14CH17N2	X17CrNi16-2
A3	NE	14CH17N2	X17CrNi16-2
A4	ANO	14CH17N2	X17CrNi16-2
A5	ANO	14CH17N2	X17CrNi16-2
B1	NE	08CH18N10T	X6CrNiTi18-10
B2	NE	08CH18N10T	X6CrNiTi18-10
B3	NE	08CH18N10T	X6CrNiTi18-10
B4	ANO	08CH18N10T	X6CrNiTi18-10
B5	ANO	08CH18N10T	X6CrNiTi18-10
C1	NE	T552	X11CrNiMo12
C2	NE	T552	X11CrNiMo12
C3	NE	T552	X11CrNiMo12
C4	ANO	T552	X11CrNiMo12
C5	ANO	T552	X11CrNiMo12

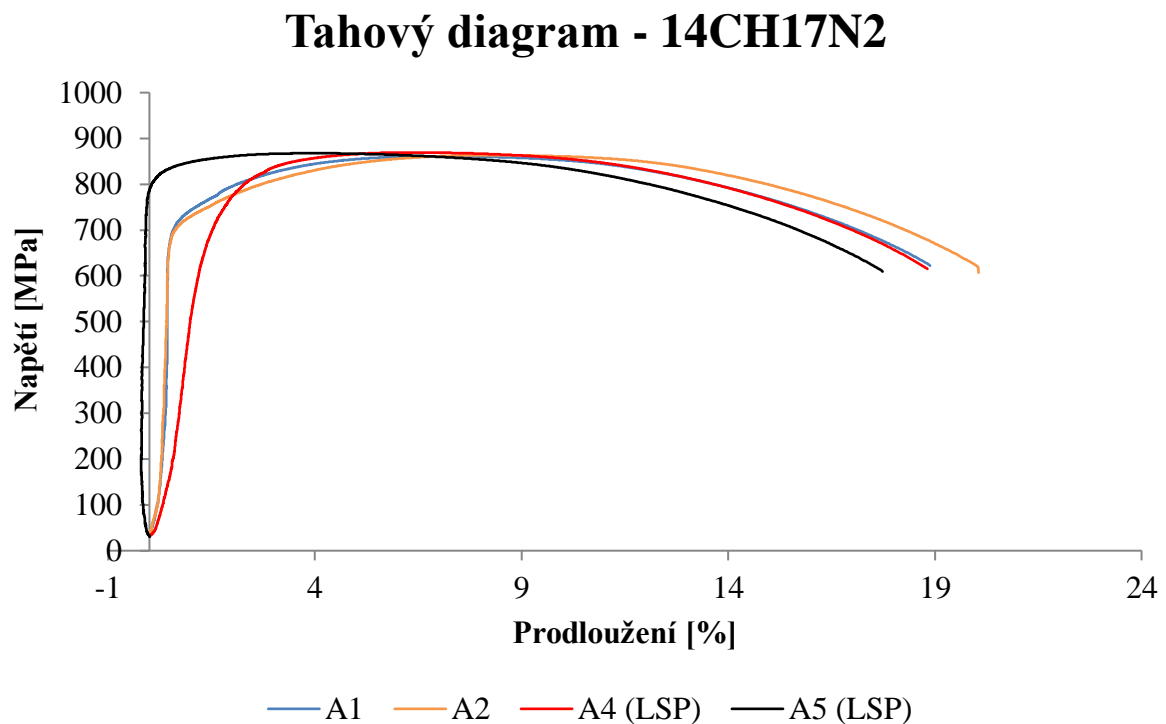
Tab. 7 - Označení vzorků pro statickou zkoušku tahem.

## 7.1 Výsledky materiálu 14CH17N2

Výsledky tahové zkoušky pro vzorky s označením A z materiálu 14CH17N2 jsou zobrazeny v tab. 8. Dalším výstupem z tahové zkoušky je tahový diagram, který je zobrazen na obr. 21.

Výsledky tahové zkoušky pro materiál 14CH17N2				
označení vzorku	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>15</sub> [%]	Z [%]
A1	715	861	19	42
A2	707	864	20	34
A3	hodnoty neměřitelné – špatně vyrobený vzorek			
Směrodatná odchylka – $\sigma$	3,6	1,2	0,6	4,3
A4	677	870	17	38
A5	812	868	18	39
Směrodatná odchylka – $\sigma$	67,4	0,9	0,5	0,4

Tab.8 - Výsledné hodnoty tahové zkoušky materiálu 14CH17N2.



Obr. 21 - Tahový diagram materiálu 14CH17N2.

Z tahové zkoušky vzorků z materiálu 14CH17N2 nelze jednoznačně určit zlepšení mechanických vlastností po provedení zpevnění metodou LSP, neboť hodnoty meze pevnosti zpevněných vzorků jsou takřka totožné jako u vzorků bez zpevnění. Hodnota napětí na mezi kluzu  $R_{p0,2}$  byla u vzorku A5 812 MPa, tato hodnota je znatelně vyšší než např. u vzorku A2, kde mez kluzu  $R_{p0,2}$  byla 707 MPa, avšak u vzorku A4 mez kluzu vykazovala nižší hodnoty než u nezpevněných vzorků. Hodnoty prodloužení a kontrakce taktéž nevykazují znatelný rozdíl.

V procesu měření nastaly možné chyby. U vzorku A3 tato chyba byla způsobena již ve výrobě, kdy vzorek nebyl vyroben v požadované jakosti a dle příslušné výkresové dokumentace, a to zapříčinilo v nemožnost provedení samotného měření. Další chybou jsou záporné hodnoty poměrného prodloužení v oblasti pod  $R_{p0,2}$  u vzorku A5. Tato chyba byla způsobena laserovým extenzometrem a taktéž nepřesně vyrobeným vzorkem, kdy při zatěžování nejprve došlo k vyrovnání vzorku a tím ke zkrácení vzdálenosti mezi laserovými extenzometry. Avšak, další průběh zkoušky zůstal neovlivněn, proto lze měření vzorku A5 považovat za validní.

Z výsledků lze usoudit, že aplikace LSP v případě materiálu 14CH17N2 nemá tak zásadní vliv na výslednou pevnost a další doprovodné veličiny zjišťující z tahové zkoušky.

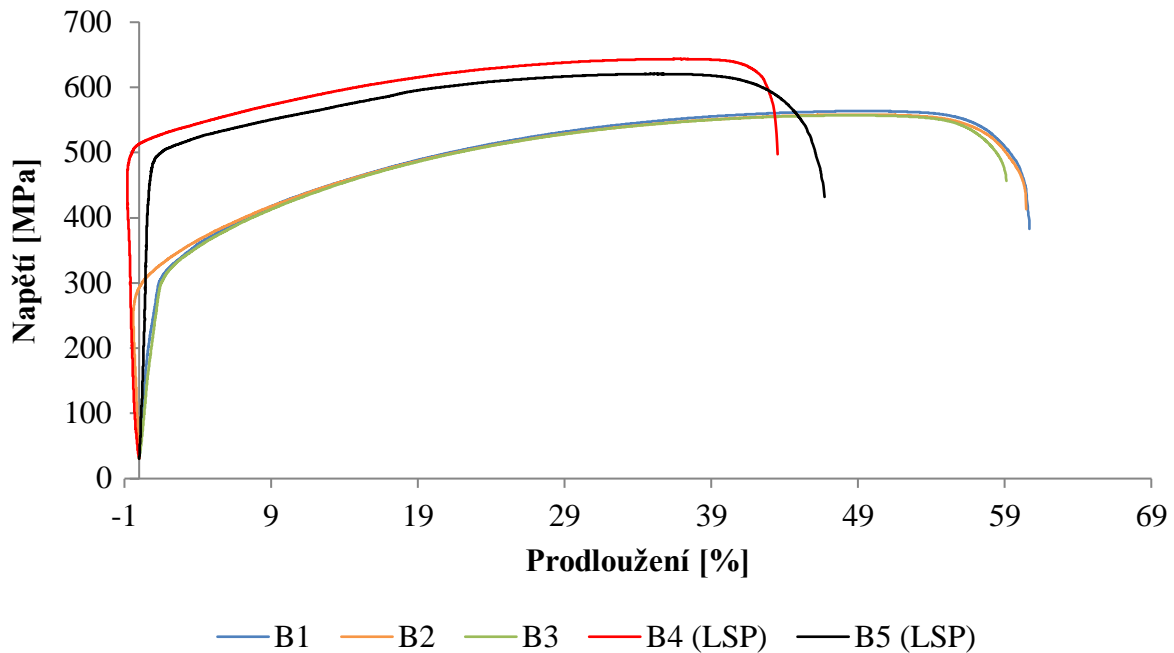
## 7.2 Výsledky materiálu 08CH18N10T

Výsledky tahové zkoušky pro vzorky s označením B z materiálu 08CH18N10T jsou zobrazeny v tab. 9. Dalším výstupem z tahové zkoušky je tahový diagram, který je zobrazen na obr. 22 na následující straně.

Výsledky tahové zkoušky pro materiál 08CH18N10T				
označení vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{15}$ [%]	Z [%]
B1	227	564	60	56
B2	287	551	63	57
B3	267	557	57	55
Směrodatná odchylka – $\sigma$	24,9	5,2	2,1	0,8
B4	492	644	45	42
B5	470	621	46	47
Směrodatná odchylka – $\sigma$	11,2	11,5	0,9	2,6

Tab.9 - Výsledné hodnoty tahové zkouška materiálu 08CH18N10T.

## Tahový diagram - 08CH18N10T



Obr. 22 - Tahový diagram materiálu 08CH18N10T.

Z tahové zkoušky materiálu 08CH18N10T lze jednoznačně určit pozitivní vliv LSP na mechanické vlastnosti daného materiálu. Z výsledků je patrný nárůst na mezi pevnosti konkrétně napětí na mezi pevnosti u vzorku B2 je 551 MPa a oproti tomu napětí  $R_m$  u vzorku s LSP B4 je 644 MPa. Razantnější nárůst nastal na mezi kluzu  $R_{p0,2}$ , kdy u vzorku B2 hodnota činí 287 MPa a u vzorku s LSP označeném B4 je tato hodnota 492 MPa.

I v tomto měření nastaly možné chyby. Záporné hodnoty prodloužení pod mezi kluzu  $R_{p0,2}$  u vzorků B2 a B4 jsou způsobeny totožnou chybou jako u měření předešlé série vzorků s označením A. Tyto hodnoty nemají žádný vliv na další průběh měření, proto lze měření vzorků B2 a B4 považovat za validní.

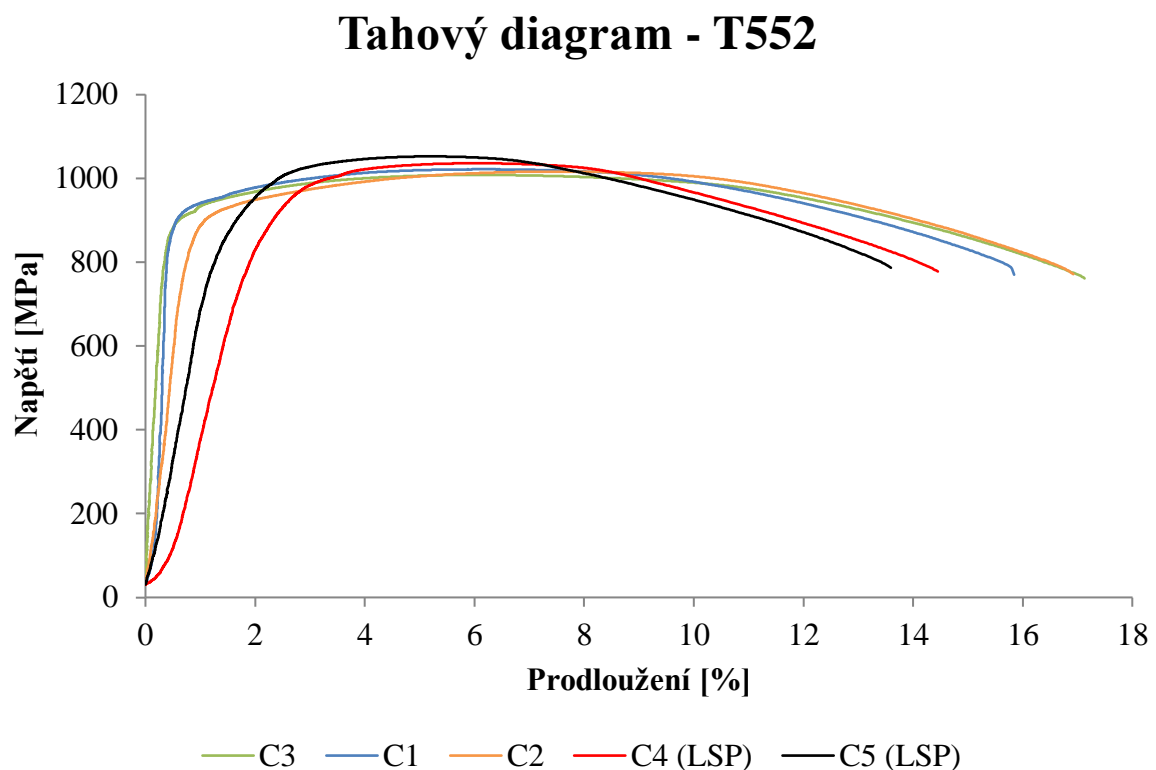
Z výsledků materiálu typu 08CH18N10T lze jednoznačně určit pozitivní vliv LSP na hodnoty, které jsou výstupem tahové zkoušky. Lze tedy považovat tento materiál za perspektivní a vhodný pro základní matici při aplikaci LSP za cílem zvýšení pevnosti.

### 7.3 Výsledky materiálu T552

Výsledky tahové zkoušky pro vzorky s označením C z materiálu T552 jsou zobrazeny v tab.10. Dalším výstupem z tahové zkoušky je tahový diagram, který je zobrazen na obr.23.

Výsledky tahové zkoušky pro materiál T552				
označení vzorku	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>15</sub> [%]	Z [%]
C1	910	1022	16	37
C2	877	1016	16	37
C3	893	1008	17	38
Směrodatná odchylka – $\sigma$	13,6	5,4	0,6	0,7
C4	847	1036	13	36
C5	848	1053	13	32
Směrodatná odchylka – $\sigma$	0,1	8,2	0,1	2,3

Tab.10 - Výsledné hodnoty tahové zkoušky materiálu T552.



Obr. 23 - Tahový diagram materiálu T552.

Materiál T552 nevykazuje zlepšené vlastnosti po aplikaci LSP. Hodnoty meze pevnost  $R_m$  zpevněných vzorků jsou sice mírně vyšší, ale nelze jednoznačně určit, zda nárůst hodnot je v důsledku aplikace LSP, nebo hodnoty jsou v rámci odchylky od neupravovaných vzorků.

Zvláštností, která plyne z výsledků tahové zkoušky tohoto materiálu je pokles  $R_{p0,2}$  a zároveň nárůst meze pevnosti  $R_m$  u zpevněných vzorků. Tento jev by mohl být přisuzován relaxaci napětí pod mezí  $R_{p0,2}$  a následných procesem zpevnění po překročení této meze. Zároveň nelze jednoznačně určit nastalý stav za správný a jednoznačný, možných příčin by mohlo být objeveno více. Pro ověření této teorie by bylo potřeba provést opakované měření s více reprezentativním vzorky a jednoznačně určit chování tohoto materiálu po zpevnění.

Z tohoto měření vyplývá, že zpevňování metodou LSP u materiálu T552 nemá tak znatelný dopad na mechanické vlastnosti zjišťované z tahové zkoušky.

## 7.4 Závěr z měření

Měření tahové zkoušky prokázalo částečně zlepšení vlastností zpevněných vzorků na mezi kluzu  $R_{p0,2}$  a hlavně na mezi pevnosti  $R_m$ .

Nejlepší zlepšení v daných vlastnostech vykazoval materiál 08CH18N10T, který má z tohoto důvodu nejlepší perspektivu pro používání aplikace zpevňování pomocí LSP na součástech pracujících v jaderném strojírenství.

Výsledky z tahové zkoušky byly částečně ovlivněny kvalitou dodaných vzorků, která neodpovídala požadavkům, to bylo reflektováno ve výskytu „nesmyslných“ záporných hodnot poměrného prodloužení u řady vzorků napříč všemi materiály. Při zatěžování nejprve docházelo k narovnání vzorků a tím ke zkrácení vzdálenosti mezi laserovými extenzometry, a tudíž ke generování již zmíněných záporných hodnot. Tato chyba ale neovlivnila další postup měření. Nelze tedy výsledky rozporovat a určit měření za nevyhovující.

Pro přesnější zjištění vlivů LSP na mechanické vlastnosti u všech tří testovaných materiálů, zejména na mez kluzu a mez pevnosti, by v budoucím výzkumu bylo potřeba provést zkoušky na nových sadách vzorků, již lépe zpracovaných, a pro měření použít přesnějších dotkových extenzometrů namísto laserových.

Dalším zjištěním z tahové zkoušky je nestandardní chování materiálu T552 po zpevnění. Tyto vzorky vykazovaly nárůst meze pevnosti  $R_m$ , ale zároveň pokles hodnot na mezi kluzu  $R_{p0,2}$ . Pro lepší prozkoumání chování materiálu T552 po zpevnění je potřeba v dalším výzkumu provést měření na širším počtu vzorků.

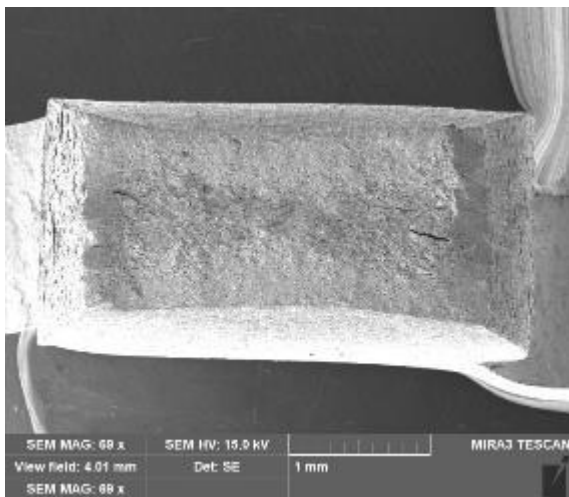


## 8 Fraktografie

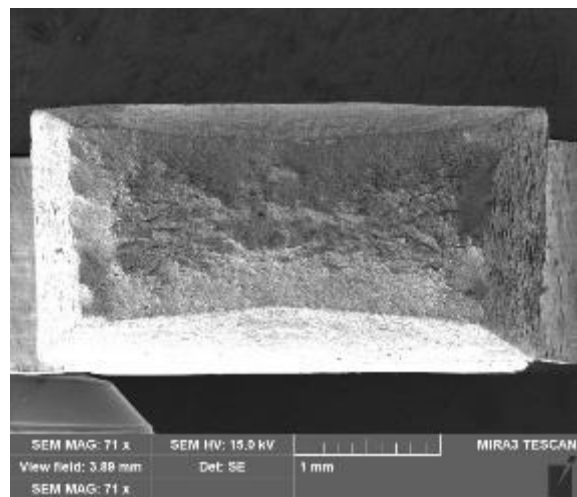
Pro zkoumání fraktografie byly použity vzorky z tahové zkoušky. Byl vybrán vždy jeden reprezentativní vzorek od každého stavu, tedy jeden vzorek bez LSP a jeden vzorek s LSP. Následně byly vzorky porovnávány mezi sebou a byl zkoumán vliv LSP na lomovou plochu jednotlivých materiálů.

### 8.1 Lomová plocha materiálu 14CH17N2

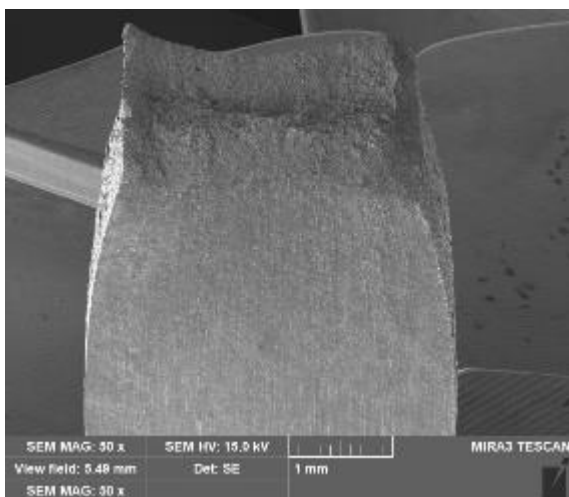
Na obr. 24–31 níže jsou znázorněny lomové plochy vzorků z materiálu 14CH17N2 (s označením A). Vždy byly porovnávány snímky zpevněných vzorků pomocí LSP a vzorků nezpevněných. Konkrétně se jednalo o přehledové snímky lomové plochy z okraje lomu, středu lomu a snímky lomu ve 45°. Byly vybrány vzorky s označením A3 a A4



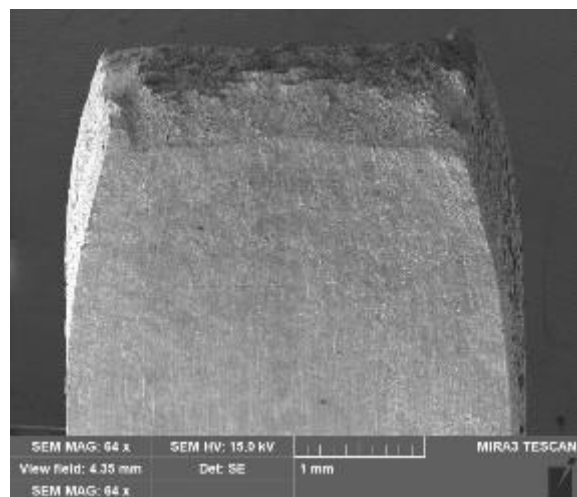
Obr.24 - Lomová plocha vzorku A3.



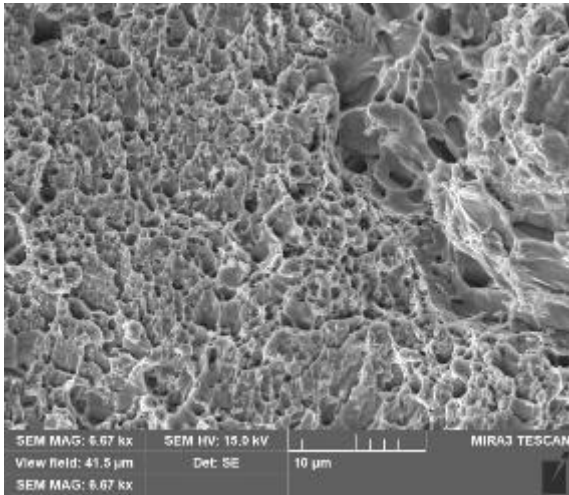
Obr.25 - Lomová plocha vzorku s LSP A4.



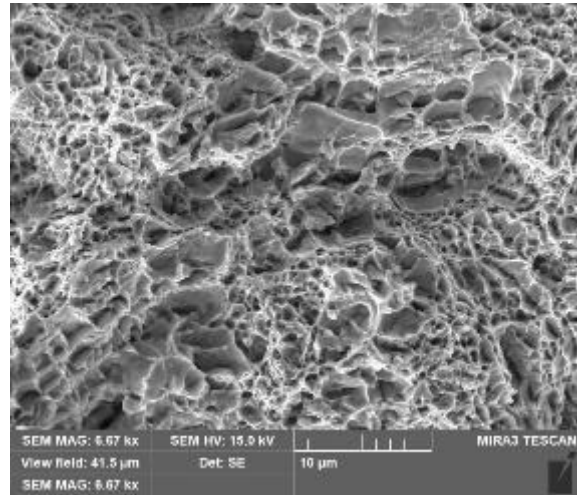
Obr.26 - Lomová plocha vzorku A3 - pod 45°.



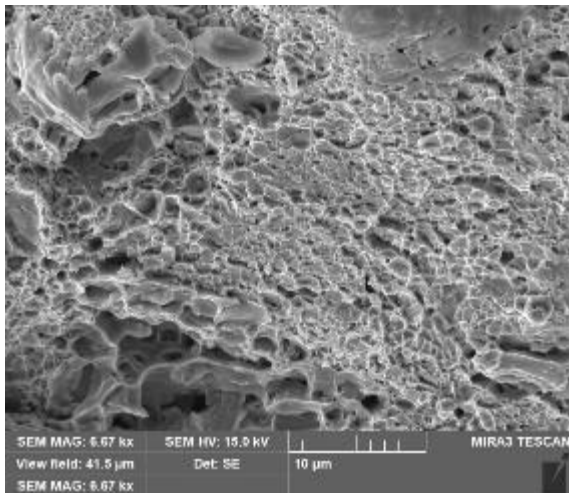
Obr.27 - Lomová plocha vzorku A4 s LSP - pod 45°.



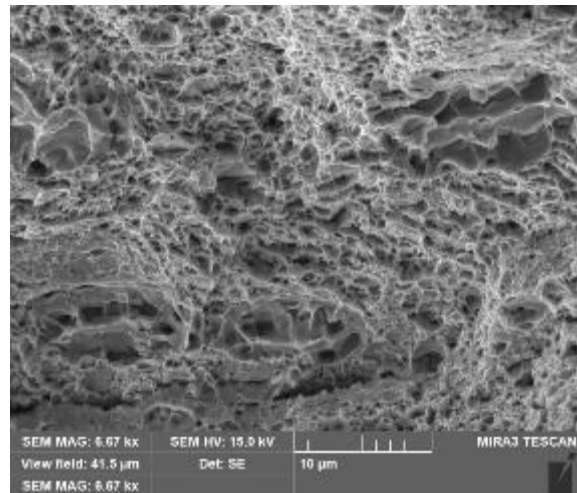
Obr.28 - Lomová plocha vzorku A3 – kraj.



Obr.29 - Lomová plocha vzorku A3 s LSP – kraj.



Obr.30 - Lomová plocha vzorku A3 – střed.



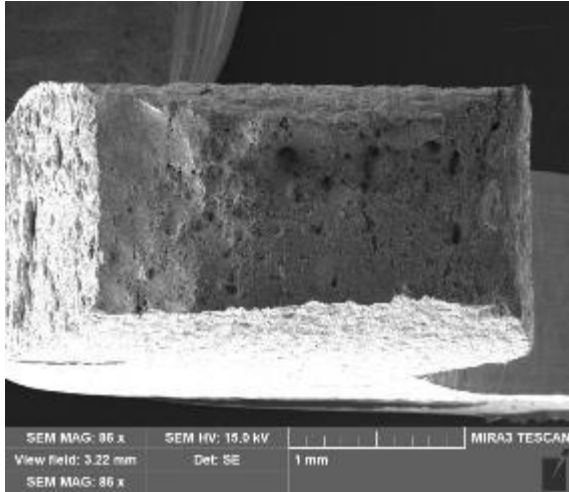
Obr.31 - Lomová plocha vzorku A4 s LSP – střed.

Ze zkoumání lomových ploch materiálu 14CH17N2 je patrné že nastal tvárný, neboli houževnatý lom, který vznikl štěpením a je charakterizován jednoznačně určitelnými jamkami, které jsou menšího či většího charakteru bez ohledu na místo pozorování zda byl pozorován okraj, nebo střed. Lom vykazuje transkrystalické chování.

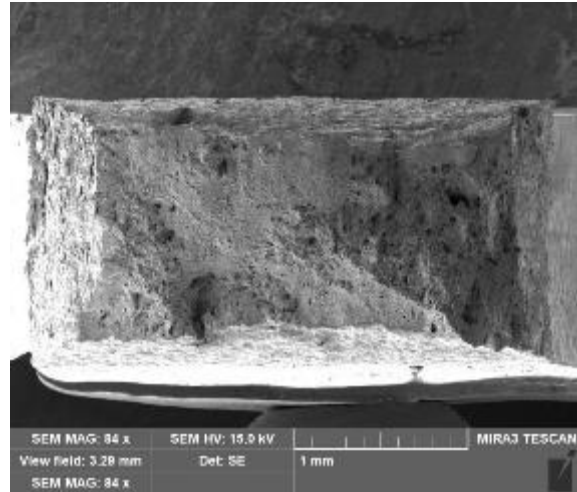
U pozorovaných obr. 26 a obr. 27 pod úhlem 45° je patrný typický číškový lom, který vzniká jednoosým tahovým zatěžováním. Tento typ lomu je pozorován u obou typů vzorků, zpevněného a nezpevněného. Z fraktografie lze vyhodnotit, že LSP aplikované na tento materiál nemá výrazný vliv na typ lomu, neboť u obou vzorků nastal houževnatý lom číškového charakteru.

## 8.2 Lomová plocha materiálu 08CH18N10T

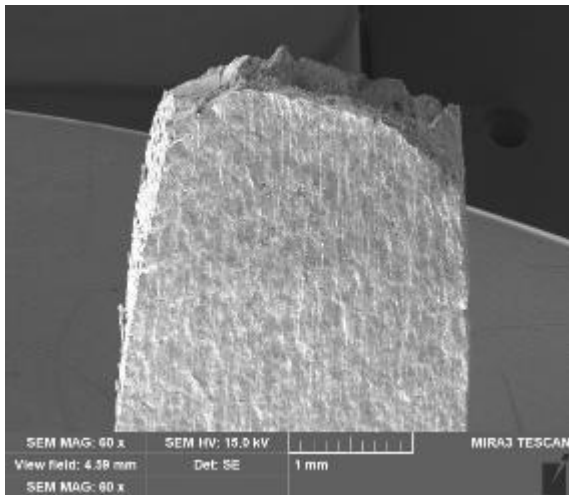
Na obr. 32–40 níže jsou znázorněny lomové plochy vzorků z materiálu 08CH18N10T (s označením B). Vždy byly porovnávány snímky zpevněných vzorků pomocí LSP a vzorků nezpevněných. Konkrétně se jednalo o přehledové snímky lomové plochy z okraje lomu, středu lomu a snímky lomu ve 45°. Byly vybrány vzorky s označením B2 a B5.



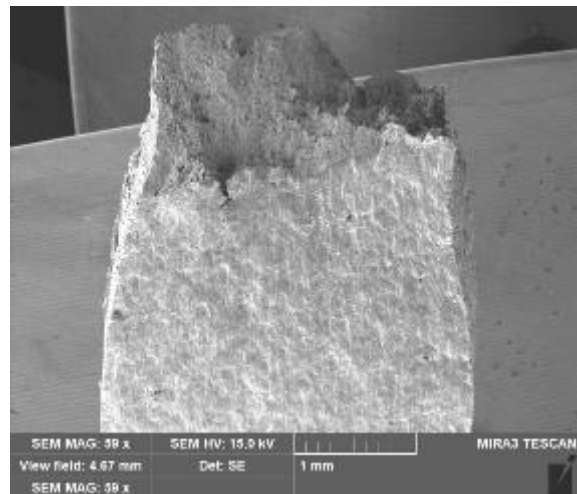
Obr.32 - Lomová plocha vzorku B2.



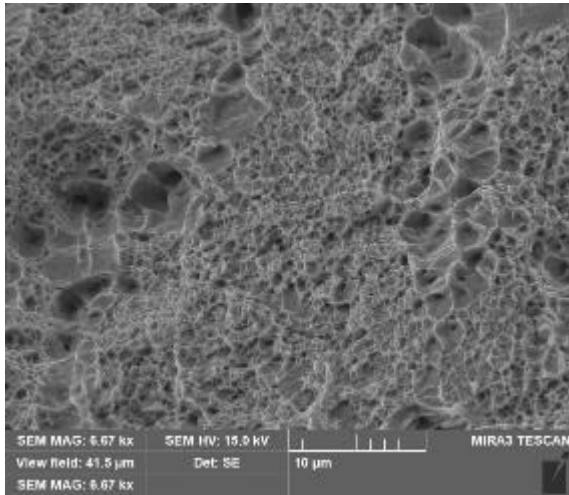
Obr.33 - Lomová plocha vzorku B5 s LSP.



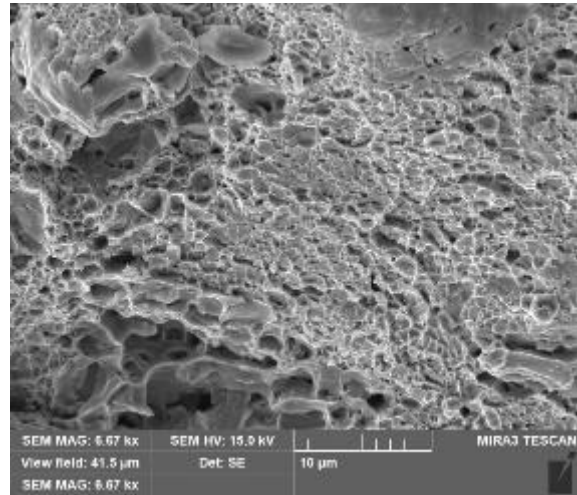
Obr.34 - Lomová plocha vzorku B2 – pod 45°.



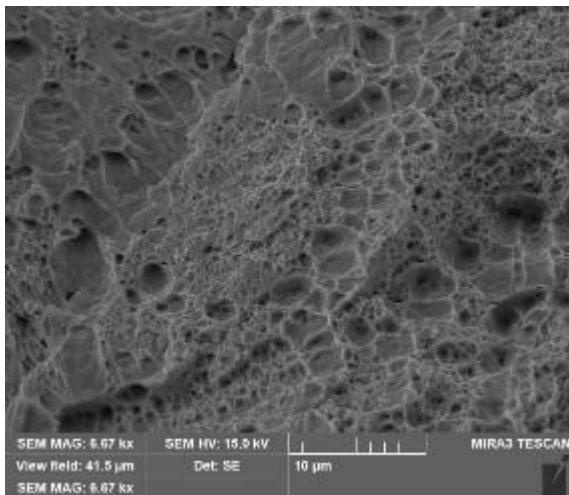
Obr.35 - Lomová plocha vzorku B5 s LSP – pod 45°.



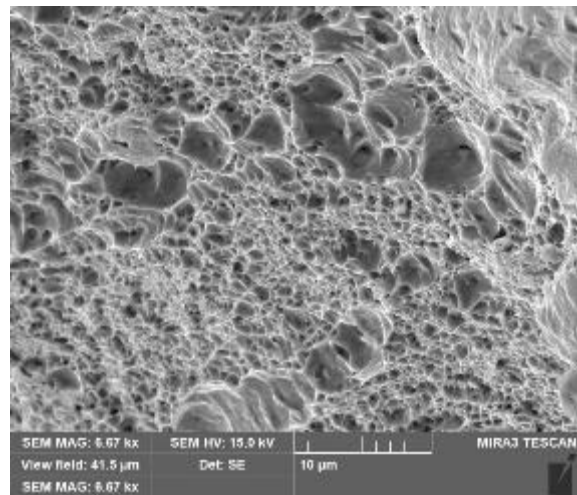
Obr.36 - Lomová plocha vzorku B2 – kraj.



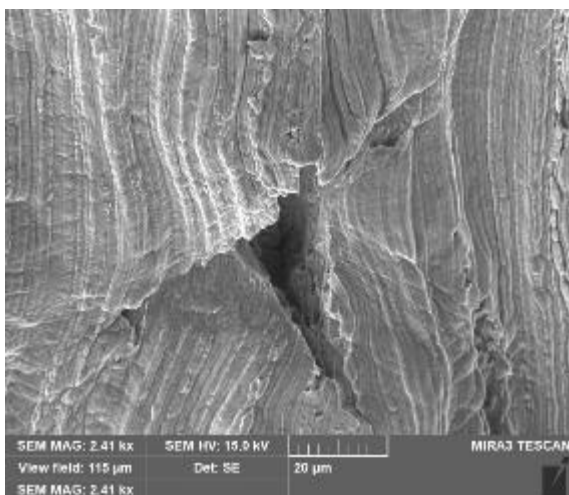
Obr.37 - Lomová plocha vzorku B5 s LSP – kraj.



Obr.38 - Lomová plocha vzorku B2 – střed.



Obr.39 - Lomová plocha vzorku B5 s LSP – střed.



Obr.40 - Lomová plocha vzorku B2 – detail trhliny.

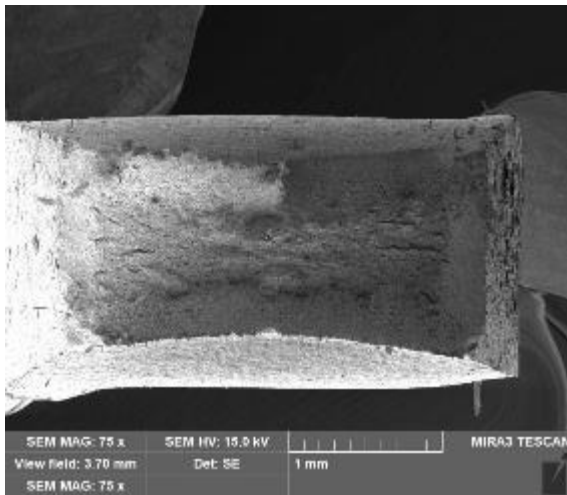
Ze zkoumání lomových ploch materiálu 08CH18N10T je patrné že nastal tvárný transkrystalický lom, který vznikl štěpením a vyznačuje se jednoznačně určitelnými jamkami, které jsou menšího či většího charakteru bez ohledu na místo pozorování zda byl pozorován okraj, nebo střed, nebo zda byl pozorován vzorek zpevněný a nezpevněný.

Při zkoumání lomové plochy vzorku B2 byla pozorována sekundární trhlina, která se nacházela z čelní strany vzorku pod samotným lomem součásti, tato mikrotrhlina mohla být iniciována z vměstku, nebo vadyna povrchu, K dolomení došlo dříve než k její další nukleaci. Detail trhliny je znázorněn na obr. 39.

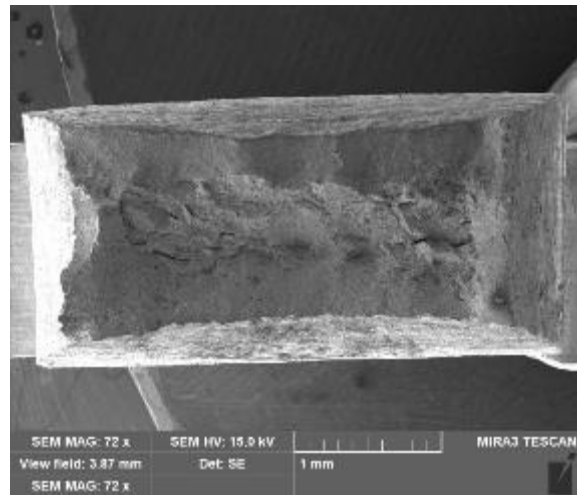
Z obr. 35 je patrné, že u zpevněného materiálu nedošlo ke vzniku typického číškového lomu a byl zde pozorován lom šikmý, nebo-li smykový, který prochází skrze celý vzorek pod úhlem přibližně 45° k ose zatěžování zkušební vzorku. Tyto smykové lomy se nejčastěji vyskytují u materiálů pevnějších a u austenitických ocelí.

### 8.3 Lomová plocha materiálu T552

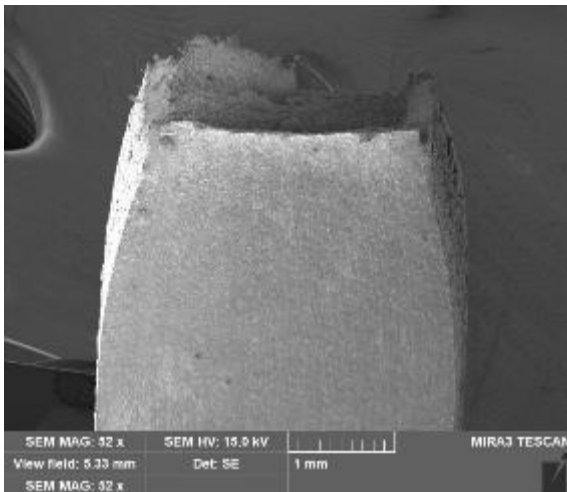
Na obr.41–48 níže jsou znázorněny lomové plochy vzorků z materiálu T552 (s označením C). Vždy byly porovnávány snímky zpevněných vzorků pomocí LSP a vzorků nezpevněných. Konkrétně se jednalo o přehledové snímky lomové plochy z okraje lomu, středu lomu a snímky lomu ve 45°. Byly vybrány vzorky s označením C2 a C4.



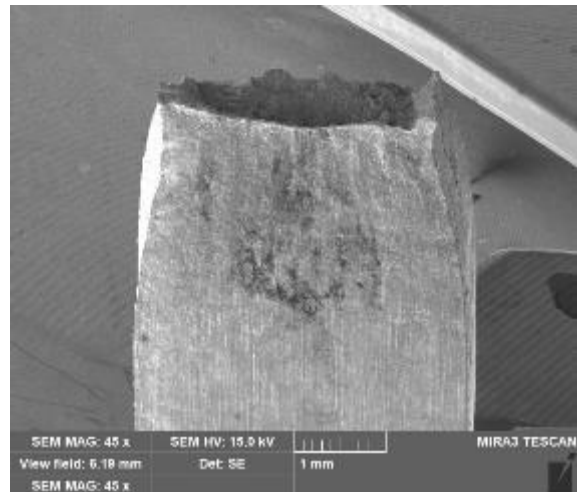
Obr. 41 - Lomová plocha vzorku C2.



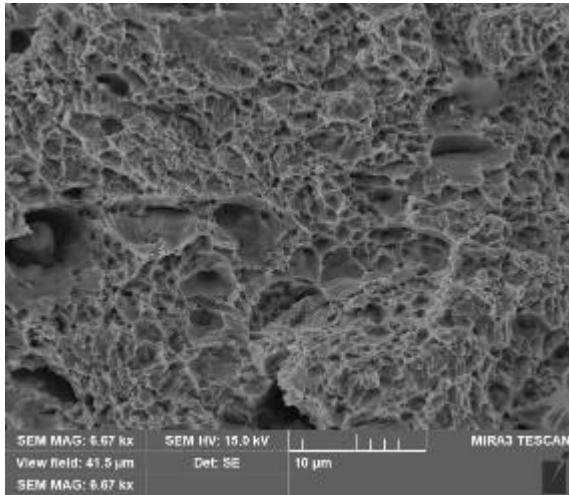
Obr.42 - Lomová plocha vzorku C4 s LSP.



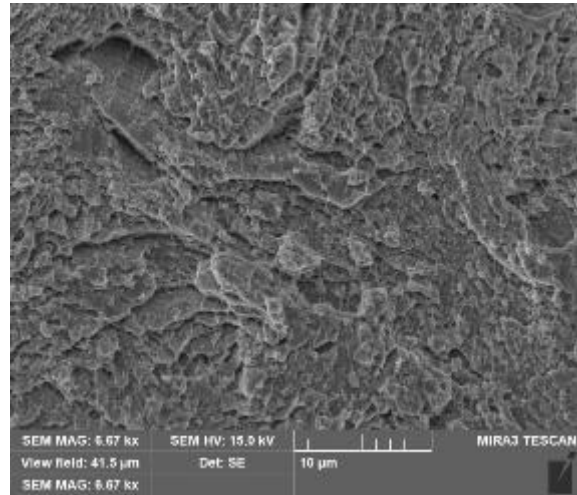
Obr. 43 - Lomová plocha vzorku C2 – pod 45°.



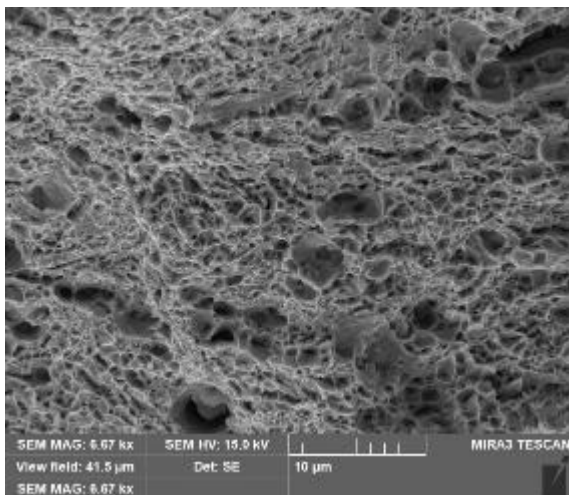
Obr. 44 - Lomová plocha vzorku C4 s LSP – pod 45°.



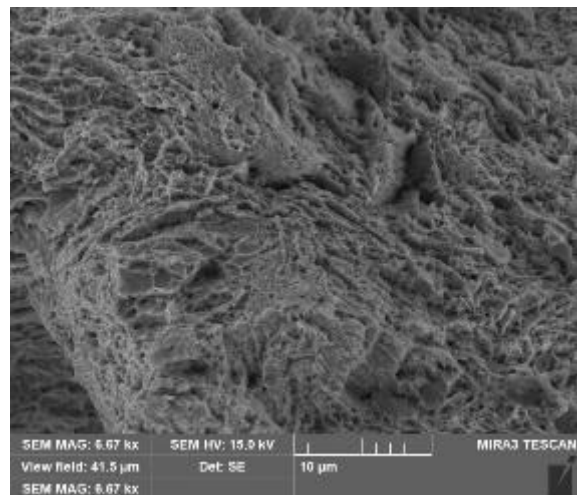
Obr. 45 - Lomová plocha vzorku C2 – kraj.



Obr. 46 - Lomová plocha vzorku C4 s LSP – kraj.



Obr. 47 - Lomová plocha vzorku C2 – střed.



Obr. 48 - Lomová plocha vzorku C4 s LSP – střed.

Ze zkoumání lomových ploch materiálu T552 je patrné, že nastal tvárný transkrystalický lom s jednoznačně určitelnými jamkami, které jsou menšího či většího charakteru bez ohledu na místo pozorování zda byl pozorován okraj, nebo střed. Lom je transkrystalický.

U obr. 43 a obr. 44 je patrný typický číškový lom, který vzniká jednoosým tahovým zatěžováním. Tento typ lomu je pozorován u obou typů vzorků, zpevněného a nezpevněného.

Následně lze z fraktografie vyhodnotit, že LSP aplikované na tento materiál nemá vliv na typ lomu, neboť u obou vzorků nastal houževnatý lom číškového charakteru

## 8.4 Závěr z měření

Zkoumání lomových ploch prokázalo rozdíly u materiálu 08CH18N10T. U nezpevněného vzorku lze rozpoznat číškový lom a u zpevněného vzorku byl pozorován lom šikmý (smykový), který prochází skrz vzorek pod úhlem přibližně 45°C. Lom smykový se vyskytuje nejčastěji u austenitických ocelí a ocelí s vyšší pevností.



U materiálu T552 a 14CH7N2 nebyl pozorován rozdíl v lomových plochách před zpevněním a po zpevnění.

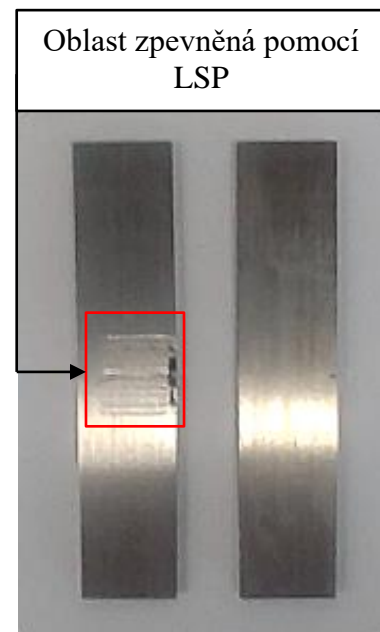
## 9 Zkouška únavové životnosti

Zkouška únavové životnosti byla prováděna dle metodiky tříbodového ohybu, tedy bylo prováděno zkoumání únavové životnosti v tlakové oblasti. Charakteristika a parametry zkoušky byly voleny z normy ČSN 42 0363. Konkrétně byl z výše popsané normy volen přírůstek ke střednímu napětí  $\sigma_m$ , který byl aplikován mezi jednotlivými měřeními.

Pro určení meze únavy byla zvolena sada vzorků z každého stavu, tzn vzorky bez zpevnění a vzorky zpevněné. Vzorky jsou znázorněny na obr. 49. Rozměry vzorků se řídili dle příslušné normy.

Pro správné provedení zkoušky byla zvolena řada parametrů a nastavení. Zatěžující poměr R byl zvolen na základě zkušeností laborantů v CVŘ a byl nastaven  $R = 0,1$ . Hodnota zatěžujícího poměru je uváděna v absolutních hodnotách, proto hodnota činí 0,1 a ne 10. Dalším parametrem zkoušky byla frekvence, která byla nastavena na základě předběžně očekávané tuhosti na hodnotu  $f = 60$  Hz.

Pro správné provedení a vyhodnocení zkoušky bylo nutno nastavit koncové podmínku, při jejichž dosažení se zkouška ukončí. První podmínkou je smluvní mez únavy, která je u oceli  $10^7$  cyklů. Po dosažení této hranice leží předpokládaná mez únavy v nekonečnu, tedy u konkrétního materiálu se nenachází. Jako druhá ukončovací podmínka zkoušky byla zvolena trhлина a její růst. Při dosažení trhliny do poloviny vzorku došlo k ukončení zkoušky. Tato podmínka je závislá na tuhosti. Ve výzkumného ústavu CV Řež bylo experimentálně zjištěno, že při poklesu tuhosti o 25 % se trhliny rozšíří právě do poloviny vzorku. Pokud by se podmínka ukončení trhliny neaplikovala a docházelo k dolomení součásti, neovlivnilo by to výslednou mez únavy, neboť při šíření trhliny více než do poloviny vzorku se zkouška nachází v oblasti nízko cyklové únavy, v řádu tisíce cyklů, tyto hodnoty nemají velký význam ve vysoko cyklové únavě. Další nespornou výhodou aplikace druhé ukončovací podmínky je ochrana stroje, konkrétně pro měření meze únavy pomocí tříbodového ohybu, kdy by docházelo při větším poklesu tuhosti k zaseknutí vzorku uvnitř měřící aparatury stroje a k následnému možnému poškození měřícího stroje.



Obr. 49 - Vzorky pro měření únavové životnosti; vlevo s LSP; vpravo bez LSP.

Pro správné nastavení parametrů únavové zkoušky je zapotřebí provést výpočet sil, konkrétně  $F_{\min}$ ,  $F_{\max}$ ,  $F_m$  a  $F_a$  dle následujících rovnic. Tyto výpočty je nutné provést pro každý vzorek zvlášť.

Z rovnice (1)  $\sigma_D$  lze vyjádřit sílu  $F_{\max}$ , za  $\sigma_D$  dosazujeme námi zvolené  $\sigma_m$ .

$$\sigma_D = \frac{3}{2} * \frac{F_{\max} * L}{b * d^2} \rightarrow F_{\max} = \frac{b * d^2}{L} * \frac{2}{3} * \sigma_D \text{ [kN]} \quad (1)$$

$b$  = šířka vzorku [mm]

$d$  = šířka vzorku v místě vrubu [mm]

$L$  = vzdálenost podpěr [mm]

$\sigma_D$  = dovolené napětí [MPa]

Výpočet  $F_{\min}$ :

$$F_{\min} = R * F_{\max} \text{ [kN]} \quad (2)$$

$R$  = zatěžující poměr

Výpočet  $F_m$ :

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \text{ [kN]} \quad (3)$$

Výpočet  $F_a$ :

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \text{ [kN]} \quad (4)$$

## 9.1 Únavová životnost materiálu 14CH17N2

Před samotným měřením únavové životnosti bylo nutné změřit jednotlivé vzorky a správně určit parametry sil dle rovnic 1 až 4. Příklad výpočtu pro vzorek bez LSP s číselným označením 5.0.1 je znázorněn v rovnicích níže.

$$F_{\max} = \frac{b * d^2}{L} * \frac{2}{3} * \sigma_D = \frac{0,00205 * 0,011^2}{0,4} * \frac{2}{3} * 200 = \mathbf{0,83 \text{ [kN]}}$$

$$F_{\min} = R * F_{\max} = 0,1 * 0,83 = \mathbf{0,08 \text{ [kN]}}$$

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} = \frac{0,83 + 0,08}{2} = \mathbf{-0,46 \text{ [kN]}}$$

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} = \frac{0,83 - 0,08}{2} = \mathbf{0,37 \text{ [kN]}}$$



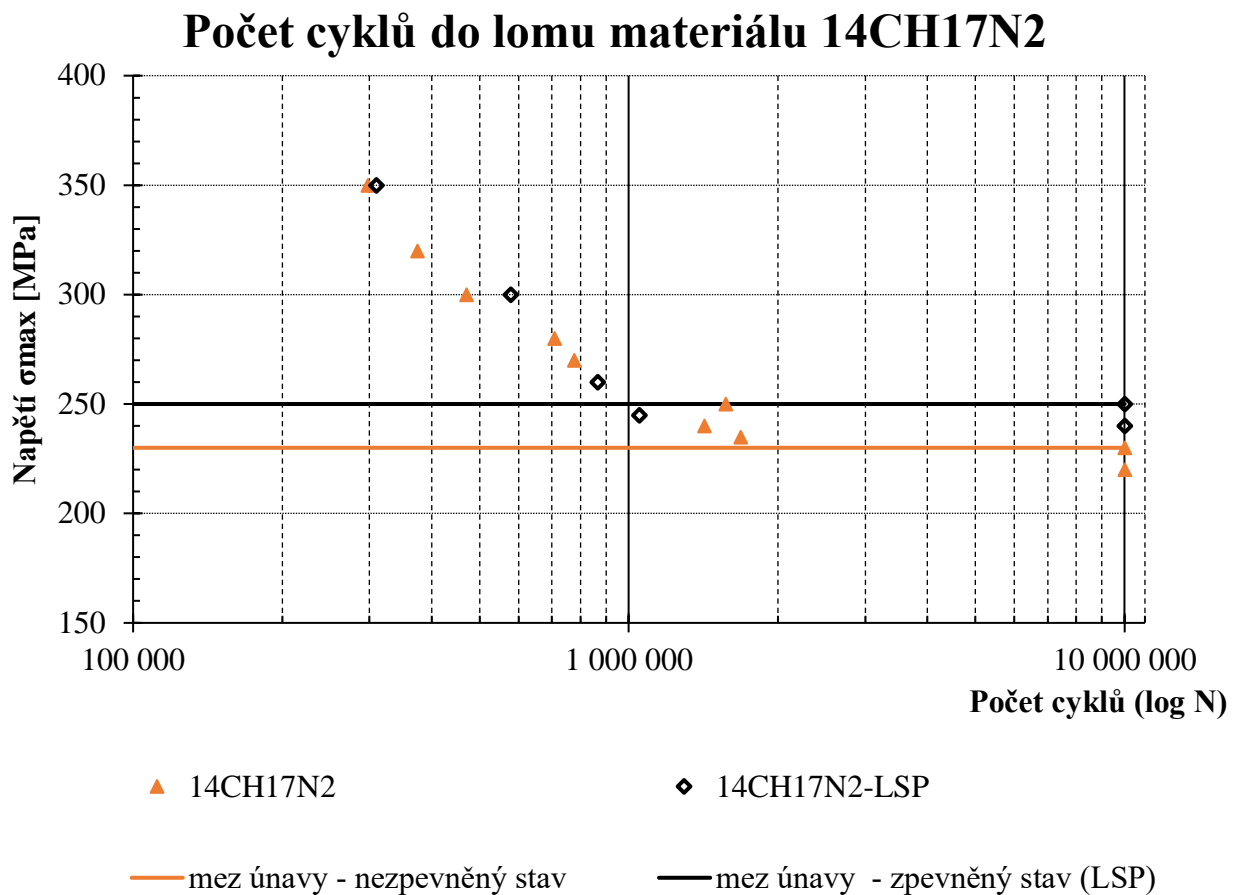
Zbylé vypočtené hodnoty jsou zaznamenány spolu s výsledky zkoušky pro materiál bez LSP v tab.11 a pro materiál zpevněný pomocí LSP v tab. 12. Dále byl sestaven graf závislosti počtu cyklů na zatěžovaném napětí. Graf je znázorněn na obr. 50 na následující straně. V grafu jsou také zobrazeny úsečky meze únavy pro stav bez zpevnění a pro stav po zpevnění.

Únavová zkouška třibodovým ohybem materiálu 14CH17N2 - bez LSP														
vzorek	charakteristické rozměry vzorku [mm]					nastavení zkoušky			vypočtené parametry dle rovnic (1) (2) (3) (4)				výstupy zkoušky	
	výška	pod vrubem d	šířka b	vrub	průřez $S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	vzdálenost podpěr L [mm]	R	napětí v ohybu - $\sigma_{max}$ [Mpa]	$F_{max}$ [kN]	$F_{min}$ [kN]	$F_m$ [kN]	$F_a$ [kN]	f [Hz]	Počet cyklů do lomu
5.0.1	12	11,04	2,05	V	22,63	40	0,1	200	0,83	0,008	-0,46	0,37	60	10 000 000
5.0.2	12,03	11,09	2,02	V	22,40	40	0,1	220	0,9	0,09	-0,5	0,41		10 000 000
5.0.3	12,03	11,07	2,04	V	22,58	40	0,1	250	1,04	0,1	-0,57	0,47		1 568 114
5.0.4	12,04	11,13	2,03	V	22,59	40	0,1	240	1,01	0,1	-0,55	0,45		1 421 574
5.0.5	12,03	11,08	2,02	V	22,38	40	0,1	230	0,95	0,1	-0,52	0,43		10 000 000
5.0.6	12,02	11,09	1,98	V	21,96	40	0,1	235	0,95	0,1	-0,52	0,43		1 681 812
5.0.7	12	11,08	2,03	V	22,49	40	0,1	270	1,12	0,11	-0,62	0,50		776 655
5.0.1	12	11,04	2,05	V	22,63	40	0,1	280	1,17	0,12	-0,64	0,52		707 662
5.0.9	12,01	11,10	2,04	V	22,65	40	0,1	300	1,26	0,13	-0,69	0,57		470 689
5.0.10	12,02	11,10	2,01	V	22,31	40	0,1	320	1,92	0,13	-0,73	0,59		374 070
5.0.11	12,03	11,08	2,02	V	22,38	40	0,1	350	1,45	0,14	-0,8	0,65		297 472

Tab.11 - Výsledky únavové zkoušky pro materiál 14CH17N2 bez LSP.

Únavová zkouška třibodovým ohybem materiálu 14CH17N2 - s LSP														
vzorek	charakteristické rozměry vzorku [mm]					nastavení zkoušky			vypočtené parametry dle rovnic (1) (2) (3) (4)				výstupy zkoušky	
	výška	Pod vrubem d	šířka b	vrub	průřez $S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	vzdálenost podpěr L [mm]	R	napětí v ohybu - $\sigma_{max}$ [Mpa]	$F_{max}$ [kN]	$F_{min}$ [kN]	$F_m$ [kN]	$F_a$ [kN]	f [Hz]	Počet cyklů do lomu
5.1.5		11,05	2,02	V	22,32	40	0,1	350	1,44	0,14	-0,79	0,65	60	309 236
5.1.6	12,05	11,13	2,02	V	22,48	40	0,1	300	1,25	0,13	-0,69	0,56		577 513
5.1.7	12,05	13,13	2,03	V	22,60	40	0,1	250	1,05	0,10	-0,58	0,47		10 000 000
5.1.8	12,05	13,13	2,01	V	22,37	40	0,1	260	1,08	0,11	-0,59	0,49		865 182
5.1.9	12,06	11,13	2,02	V	22,48	40	0,1	240	1,00	0,10	-0,53	0,45		10 000 000
5.1.10	12,05	11,11	2,01	V	22,31	40	0,1	245	1,01	0,10	-0,56	0,46		1 051 208

Tab.12 - Výsledky únavové zkoušky pro materiál 14CH17N2 s LSP.



Obr.50 - Graf únavové životnosti materiálu 14CH17N2 s nezpevněným stavem a se stavem zpevněným.

Při měření únavové životnosti materiálu 14CH17N2 v nezpevněném stavu byly zjištěny hodnoty napětí na mezi únavy 200-230 MPa a u materiálu ve zpevněném stavu vzorky vykazovaly únavovou životnost při 250 MPa. Z výsledků je tedy patrné, že zpevňování pomocí LSP má vliv na vzrůstající únavovou životnost

## 9.2 Únavová životnost materiálu 08CH18N10T

Před samotným měřením únavové životnosti materiálu 08CH18N10T bylo nutné změřit jednotlivé vzorky a správně určit parametry sil dle rovnic 1 až 4. Příklad výpočtu pro vzorek bez LSP s číselným označením 4.3.10 je znázorněn v rovnicích níže.

$$F_{\max} = \frac{b * d^2}{L} * \frac{2}{3} * \sigma_D = \frac{0,00213 * 0,011^2}{0,4} * \frac{2}{3} * 180 = \mathbf{0,78 [kN]}$$

$$F_{\min} = R * F_{\max} = 0,1 * 0,78 = \mathbf{0,08 [kN]}$$

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} = - \frac{0,78 + 0,08}{2} = \mathbf{-0,43 [kN]}$$

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} = \frac{0,78 - 0,08}{2} = \mathbf{0,35 [kN]}$$

Zbylé vypočtené hodnoty jsou zaznamenány spolu s výsledky zkoušky pro materiál bez LSP v tab. 13 a pro materiál zpevněný pomocí LSP v tab.14. Dále byl sestaven graf závislosti počtu cyklů na zatěženém napětí, který je zobrazen na obr. 51. V grafu jsou dále znázorněny úsečky únavové životnosti pro stav bez zpevnění a pro stav po zpevnění.

Únavová zkouška třibodovým ohybem materiálu 08CH18N10T - bez LSP														
vzorek	charakteristické rozměry vzorku [mm]					nastavení zkoušky			vypočtené parametry dle rovnic (1) (2) (3) (4)				výstupy zkoušky	
	výška	pod vrubem d	šířka b	vrub	průřez S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	vzdálenost podpěr [mm]	R	napětí v ohybu - σ <sub>max</sub> [Mpa]	F <sub>max</sub> [kN]	F <sub>min</sub> [kN]	F <sub>m</sub> [kN]	F <sub>a</sub> [kN]	f [Hz]	Počet cyklů do lomu
4.3.10	12	11,08	2,13	V	23,60	40	0,1	180	0,78	0,08	-0,43	0,35	53,63	3 486 724
4.3.10	12	11,08	2,13	V	23,60	40	0,1	220	0,96	0,1	-0,53	0,43	53,6	1 500 000
4.3.10	12	11,08	2,13	V	23,60	40	0,1	280	1,22	0,12	-0,67	0,55	53,4	139 200
4.3.11	12	11,10	2,03	V	22,53	40	0,1	280	1,17	0,12	-0,64	0,53	54,1	237 181
4.3.12	12	11,09	1,95	V	21,63	40	0,1	250	1,00	0,1	-0,55	0,45	53,3	483 151
4.3.13	12	11,12	1,98	V	22,01	40	0,1	220	0,90	0,09	-0,49	0,4	52,8	1 469 735
4.3.14	12	11,08	2,04	V	22,60	40	0,1	220	0,92	0,09	-0,51	0,41	23,2	1 039 478
4.3.24	12	11,09	2,18	V	24,17	40	0,1	260	1,16	0,12	-0,64	0,52	54,4	320 897
4.3.28	12	11,09	2,06	V	22,86	40	0,1	270	1,14	0,11	-0,63	0,51	53,9	258 452
4.3.30	12	11,09	2,07	V	22,97	40	0,1	280	1,19	0,12	-0,65	0,53	53,9	282 092
4.3.22	12	11,10	2,02	V	22,42	40	0,1	290	1,20	0,12	-0,66	0,54	53,9	227 471
4.3.18	12	11,12	1,94	V	21,57	40	0,1	200	0,80	0,08	-0,44	0,36	52,5	1 733 593
4.3.29	12	11,11	2,00	V	22,22	40	0,1	190	0,78	0,08	-0,43	0,35	52,5	1 534 424
4.3.21	12	11,10	2,12	V	23,52	40	0,1	180	0,78	0,08	-0,43	0,35	53,5	10 000 000
4.3.25	12	11,10	2,22	V	24,64	40	0,1	180	0,82	0,08	-0,45	0,37	53,8	10 000 000

Tab.13 - Výsledky únavové zkoušky pro materiál 08CH18N10T bez LSP.



Při měření únavové životnosti materiálu 08CH18N10T bylo zjištěno, že únavová životnost nezpevněného materiálu byla při 180 MPa a u materiálu zpevněného vzorek docílil únavové životnosti při 290 MPa. Z výsledků je tedy patrné, že zpevnění pomocí LSP má razantní vliv na vzrůstající únavovou životnost.

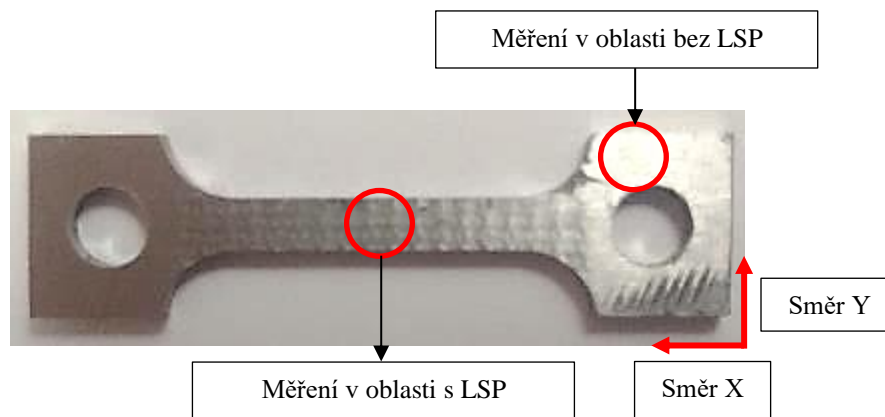
### **9.3 Závěr z měření**

Měřením únavové životnosti na materiálech 14CH17N2 a 08CH18N10T byl prokázán vliv zpevnění pomocí LSP na nárůst napětí na mezi únavy. Nejlepší zlepšení vykazoval materiál 08CHN10T, kdy hodnota napětí na mezi únavové životnosti byla o 110 MPa vyšší ve prospěch vzorků, které byly zpevněny.

Měření únavové životnosti materiálu T552 nebylo prováděno z důvodu časového vytížení stroje v laboratoři CVŘ. Toto měření bude prováděno v následujícím výzkumu.

## 10 Měření zbytkového napětí

Měření zbytkového napětí bylo prováděno pomocí metody XRD. Princip této metody byl popsán v kapitole 4.1.1.4. Měření bylo provedeno na vzorcích totožných se vzorky pro měření statické zkoušky v tahu. Na každém vzorku probíhaly dvě měření, první měření probíhalo v oblasti, na kterou nebylo aplikováno zpevnění pomocí LSP a druhé měření probíhalo v oblasti, která byla zpevněna. Vzorek s označenými oblastmi je znázorněn na obr. 52.



Obr. 52 - Vzorek pro měření zbytkového napětí s označenými místy měření.

Při zkušebním měření vzorku A v místě bez LSP byly zjištěny příliš vysoké záporné hodnoty, tyto hodnoty se vyskytovaly pouze v tenké vrstvičce a byly způsobeny broušením při přípravě vzorků. Aby přípravné operace neovlivnily výsledné hodnoty došlo k odleptání vrstvičky o tloušťce 10  $\mu\text{m}$  na všech vzorcích. Tato operace neovlivnila další průběh měření a výsledky lze považovat za validní.

Měření zbytkového napětí u zpevněných vzorků probíhalo po obou stranách vzorku, neboť aplikace LSP byla prováděna z každé strany postupně, tedy nejdříve byla zpevňována jedna strana a následně se proces zpevňování opakoval na straně druhé, a proto došlo k jejímu prohnutí do konvexního a konkávního tvaru. Měření byla označena jako konvexní a konkávní. K eliminaci tohoto jevu by bylo nutné provádět zpevňování na obou stranách současně. U vzorku bez LSP bylo měření provedeno pouze z jedné strany.

Následně bylo měření zbytkového napětí rozděleno dle směru, na měření zbytkového napětí ve směru LSP označeno jako směr X a měření kolmo ke směru provádění LSP označeno jako směr Y. Schéma směr měření zbytkového napětí je patrné z obr. 52.

Hodnoty zbytkového napětí pro vzorky, u kterých bylo prováděno zpevňování jsou v záporných hodnotách, z důvodu působení tlakového napětí, které bylo vneseno do materiálu během LSP. Toto se obecně u metod zpevňování kovových materiálů očekává.

V dalším kroku měření zbytkového napětí mělo být provedeno měření hloubkového profilu pomocí odvrtávací metody, bohužel při pokusech provést toto měření bylo zjištěno, že vzorky, které byly vybrány pro zkoumání zbytkového napětí neumožňovaly díky svým malým rozměrům samotné provedení této zkoušky.

Samotné měření zbytkového napětí pomocí metody XRD neprobíhalo v CVŘ ale bylo provedeno v centru HiLASE v Dolních Břežanech a řídilo se nastavením metody, které je zobrazeno v tab.15.

Materiál RTG zářiče	Urychlující napětí	Kolimátor	Skenovací rozsah	Čas expozice
Cr	40 kV	2 mm	119° - 134,4°	30 s

Tab.15 - Parametry metody měření zbytkového napětí pomocí XRD.

## 10.1 Výsledky materiálu 14CH17N2

Výsledné hodnoty měření zbytkového napětí pomocí metody XRD u materiálu 14CH17N2 pro vzorek bez LSP jsou znázorněny v tab. 16 a pro vzorek s LSP v tab. 17.

Hodnoty zbytkového napětí materiálu 14CH17N2 bez LSP			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>125</b>	<b>9,2</b>	<b>168</b>	<b>8,9</b>

Tab.16 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu 14CH17N2 – bez LSP.

hodnoty zbytkového napětí materiálu 14CH17N2 s LSP			
konvexní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-168</b>	<b>7,3</b>	<b>-134</b>	<b>7,9</b>
konkávní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-445</b>	<b>18,9</b>	<b>-439</b>	<b>17,5</b>

Tab.17 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu 14CH17N2 – s LSP.

Z výsledků měření zbytkového napětí pro materiál 14CH17N2 je patrný efekt zpevňování, který je doprovázen tlakovým napětím ve vzorcích. Hodnoty zbytkového napětí jsou větší po zpevňování než před provedením metody zpevňování. Dále je z výše uvedených tabulek patrný rozdíl v hodnotách zbytkového napětí pro konvexní a konkávní stranu, kdy se na konkávní straně vyskytovalo napětí znatelně vyšší a dosahovalo 445 MPa. Dále jsou v tabulce zaznamenány směrodatné odchylky měření.

## 10.2 Výsledky materiálu 08CH18N10T

Výsledné hodnoty měření zbytkového napětí pomocí metody XRD u materiálu 08CH18N10T pro vzorek bez LSP jsou znázorněny v tab. 18 a pro vzorek s LSP v tab. 19.

Hodnoty zbytkového napětí materiálu 08CH18N10T bez LSP			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>18</b>	<b>23,9</b>	<b>101</b>	<b>25,9</b>

Tab.18 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu 08CH18N10T – bez LSP.

hodnoty zbytkového napětí materiálu 08CH18N10T s LSP			
konvexní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-62</b>	<b>29,7</b>	<b>-97</b>	<b>32,1</b>
konkávní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-230</b>	<b>43,5</b>	<b>-180</b>	<b>26,5</b>

Tab.19 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu 08CH18N10T – s LSP.

Z výsledků měření zbytkového napětí pro materiál 08CH18N10T je taktéž patrný efekt zpevnování, který je doprovázen tlakovým napětím ve vzorcích. Hodnoty zbytkového napětí jsou větší po zpevnování než před provedením metody. Dále je z výše uvedených tabulek patrný rozdíl v hodnotách zbytkového napětí pro konvexní a konkávní stranu, kdy se na konkávní straně vyskytovalo napětí znatelně vyšší a dosahovalo 230 MPa. Dále jsou v tabulce zaznamenány směrodatné odchylky měření.



### 10.3 Výsledky materiálu T552

Výsledné hodnoty měření zbytkového napětí pomocí XRD u materiálu T552 pro vzorek bez LSP jsou znázorněny v tab. 20 a pro vzorek s LSP v tab.21.

Hodnoty zbytkového napětí materiálu T552 bez LSP			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>228</b>	<b>21</b>	<b>313</b>	<b>41,9</b>

Tab.20 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu T552 – bez LSP.

Hodnoty zbytkového napětí materiálu T552 s LSP			
konvexní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-317</b>	<b>38,4</b>	<b>-465</b>	<b>23</b>
konkávní			
směr X		směr Y	
hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$	hodnota [MPa]	Směrodatná odchylka – $\sigma$
<b>-545</b>	<b>18,1</b>	<b>-590</b>	<b>29,1</b>

Tab.21 - Výsledky zbytkového napětí vzorků z materiálu T552 – s LSP.

Z výsledků měření zbytkového napětí pro materiál T552 je taktéž patrný efekt zpevňování, který je doprovázen tlakovým napětím ve vzorcích. Hodnoty zbytkového napětí jsou větší po zpevňování než před provedením metody. Dále je z výše uvedených tabulek patrný rozdíl v hodnotách zbytkového napětí pro konvexní a konkávní stranu. Kdy se na konkávní straně vyskytovalo napětí znatelně vyšší a dosahovalo 545 MPa. Dále jsou v tabulce zaznamenány směrodatné odchylky měření.

### 10.4 Závěr z měření

Měření zbytkového napětí u všech měřených materiálů prokázalo vliv zpevňování, neboť se ve všech vzorcích, na kterých bylo prováděno zpevňování pomocí LSP vyskytovalo tlakové napětí, které už z principů zpevňování bylo očekáváno. Největší nárůst zbytkového tlakového napětí nastal u materiálu T552. Další poznatek z měření zbytkového napětí byl v samotné metodice aplikace LSP a jak již bylo popsáno v úvodu této kapitoly, aplikace LSP neprobíhala na obou stranách současně. Tato aplikace není vhodná z důvodu deformace součásti a rozdílných výsledcích zbytkového napětí na straně konkávní a konvexní, pro příklad tento rozdíl u materiálu T552 ve směru měření X činil 228 MPa. Tato metoda aplikace není pro průmyslovou praxi vhodná, neboť vysoké rozdíly ve zbytkovém napětí mohou způsobovat nežádoucí poruchy zpevňované součásti

## 11 Měření mikrotvrlosti

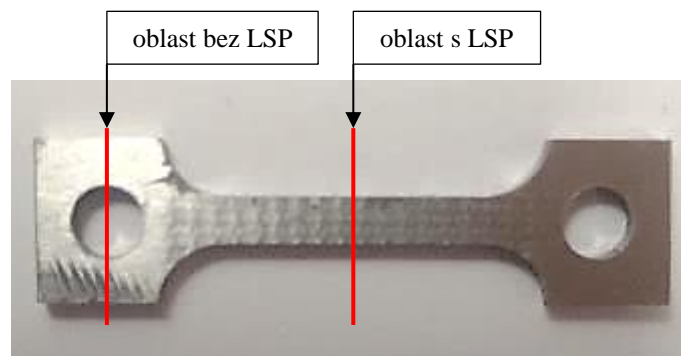
Měření mikrotvrlosti slouží jako doplňkové měření k měření zbytkového napětí a spolu tak utvoří celkový obraz o hloubce dosahu zbytkového napětí a tím závislé hloubce zpevnění při aplikacích LSP.

Mikrotvrdot byla měřena na totožných vzorcích na kterých byla prováděna měření zbytkového napětí. Z každého vzorku byla odebrána oblast bez LSP a oblast s aplikací LSP dle rozřezového schématu na obr. 53. V rozřezovém schématu jsou znázorněny dvě místa řezu, místo zpevněné a místo nezpevněné. Následné měření probíhalo příčně k řezu a následně byl sestaven graf závislosti hodnot mikrotvrlosti na vzdálenosti od povrchu.

Metoda měření byla zvolena dle Vickerse, konkrétně HV0,1. Na každém vzorku byly vytvořeny 3 řady po 15 ti měřeních, do celkové hloubky 1,5mm. Tato hloubka byla zvolena s ohledem na velikost vzorku, kdy tloušťka vzorku činí 2 mm. Měření by tak mělo věrohodně reflektovat změnu hodnot mikrotvrlosti až do jádra vzorku s určitým přesahem. První vtisk byl vytvořen 50  $\mu\text{m}$  od povrchu a každý další v rozsahu přibližně 100  $\mu\text{m}$ , tyto hodnoty by měli být dostačující k vytvoření reprezentativní křivky mikrotvrlosti a nemělo by docházet k ovlivnění sousedních vtisků.

V následujícím kroku byla stanovena směrodatná odchylka měření  $\sigma$  pro každý měřený bod.

Do grafů jsou vyneseny zprůměrované hodnoty ze tří řad. Dále jsou v grafu znázorněny dvě úsečky. Úsečka, která reprezentuje střed součásti a úsečka, která reprezentuje maximální hloubku, ve které bylo pozorováno zpevnění materiálu.



Obr.53 - Rozřezové schéma vzorků pro měření mikrotvrlosti.

## 11.1 Výsledky materiálu 14CH17N2

Výsledky Měření pro vzorek z materiálu 14CH17N2 bez LSP s označením A6 jsou patrné v tab. 22.

Mikrotvrdotost HV 0,1 oceli 14CH17N2 – bez LSP – vzorek A6																
vzdálenost od povrchu [ $\mu\text{m}$ ]		50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450
řada	1	294	291	296	286	280	297	283	290	287	298	300	298	285	284	286
	2	289	286	282	301	288	278	296	297	324	297	286	301	297	281	293
	3	306	298	302	296	304	301	303	297	294	301	282	300	295	291	304
průměrná hodnota		296	292	293	294	291	292	294	295	302	299	289	300	292	285	294
směrodatná odchylka - $\sigma$		7,1	4,9	8,4	6,2	10	10	8,3	3,3	16	1,7	7,7	1,3	5,3	4,2	7,41

Tab. 22 - Hodnoty měření mikrotvrdotosti pro materiál 14CH17N2 – vzorek bez LSP.

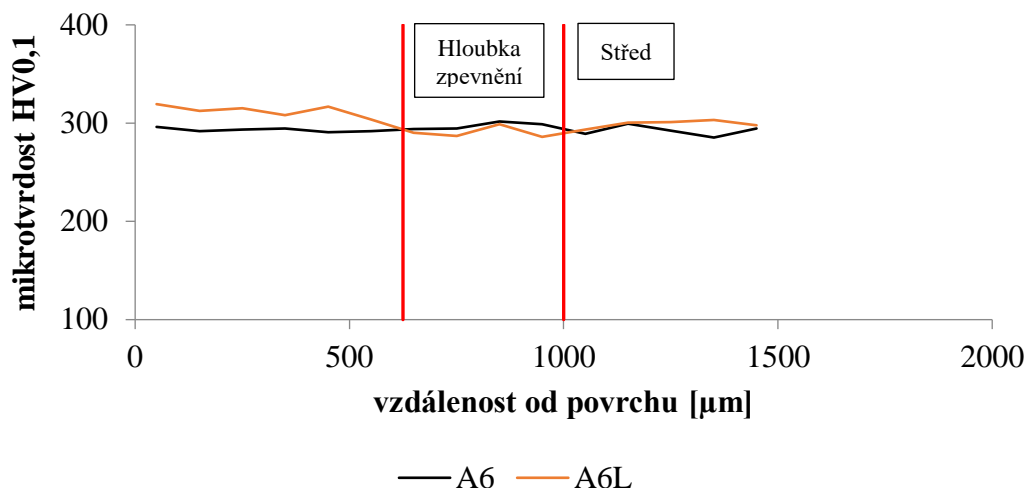
Výsledky měření pro vzorek z materiálu 14CH17N2 s LSP s označením A6L jsou patrné v tab. 23.

Mikrotvrdotost HV0,1 oceli 14CH17N2 – LSP – vzorek A6L																
vzdálenost od povrchu [ $\mu\text{m}$ ]		50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450
řada	1	314	316	327	311	331	299	288	277	307	301	295	298	308	306	311
	2	319	307	312	306	314	310	281	285	292	259	297	293	298	300	297
	3	325	315	307	307	305	302	302	298	298	298	288	310	297	303	285
průměrná hodnota		319	313	315	308	317	304	290	287	299	286	293	300	301	303	298
směrodatná odchylka - $\sigma$		4,5	4	8,5	2,2	11	4,6	8,7	8,7	6,2	19	3,9	7,13	5	2,6	10,6

Tab. 23 - Hodnoty měření mikrotvrdotosti pro materiál 14CH17N2 – vzorek s LSP.

Závislost mikrotvrdotosti na vzdálenosti od povrchu je zaznamenána v grafu na obr. 54. Dále jsou v tomto grafu patrné rozdíly mezi hodnotami mikrotvrdotosti vzorků bez LSP a s LSP a maximální hloubka zpevnění.

## Mikrotvrдость - 14CH17N2



Obr. 54 - Závislost mikrotvrđosti na vzdálenosti od povrchu pro materiál 14CH17N2.

Z grafu měření mikrotvrđosti pro materiál 14CH17N2 na obr. 54 je patrné že došlo k rozdílu hodnot tvrdosti mezi zpevněnými a nezpevněnými vzorky. Dále lze z grafu zjistit hloubku ve která ještě došlo ke zpevnění materiálu. U materiálu typu 14CH17N2 tato hloubka činila přibližně 625 μm, jinými slovy lze konstatovat, že zpevňování materiálu 14CH17N2 je efektivní do hloubky 625 μm.

## 11.2 Výsledky materiálu 08CH18N10T

Výsledky Měření pro vzorek z materiálu 08CH18N10T bez LSP s označením B6 jsou patrné v tab. 24.

Mikrotvrđost HV 0,1 oceli 08CH18N10T – bez LSP – vzorek B6																
vzdálenost od povrchu [μm]	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	
řada	1	245	212	200	210	208	204	190	194	191	182	188	191	210	192	195
	2	226	200	185	187	181	174	188	199	194	192	209	180	199	187	209
	3	256	214	206	194	204	196	172	197	200	178	179	160	173	165	175
průměrná hodnota		242	209	197	197	198	191	183	197	195	184	192	177	194	181	193
směrodatná odchylka - σ		12	6,2	8,8	9,6	12	13	8,1	2,1	3,7	5,9	12,6	12,8	15,5	11,7	14

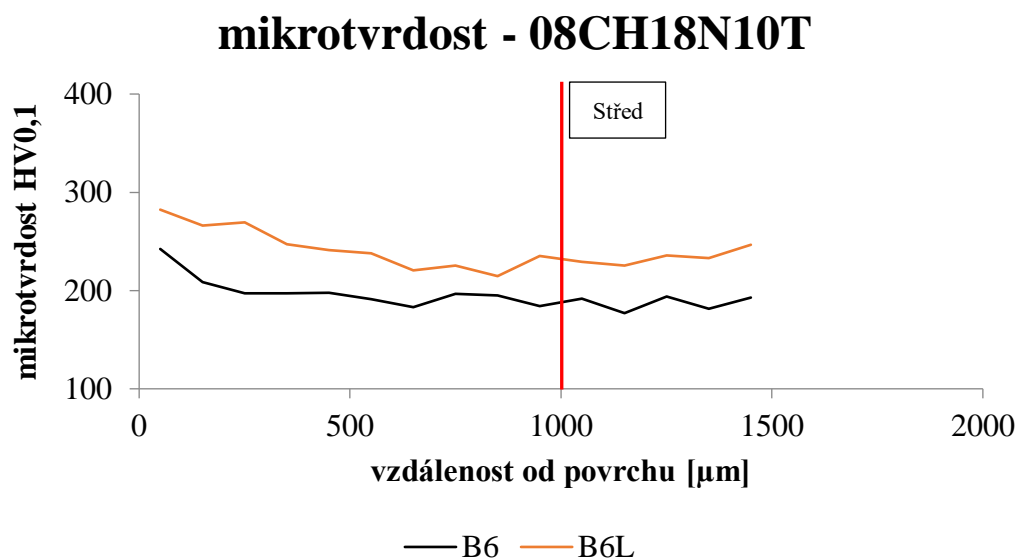
Tab. 24 - Hodnoty měření mikrotvrđosti pro materiál 08CH18N10T – vzorek bez LSP.

Výsledky Měření pro vzorek z materiálu 08CH18N10T s LSP s označením B6 jsou patrné v tab. 25 na následující straně.

Mikrotvrdość HV0,1 oceli 08CH18N10T – LSP – vzorek B6L																
vzdálenost od povrchu [ $\mu\text{m}$ ]		50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450
řada	1	281	280	272	240	245	259	224	232	216	241	233	229	238	239	258
	2	298	254	260	259	231	231	215	222	209	227	219	215	244	223	245
	3	268	264	276	243	248	224	222	222	219	238	235	232	226	237	237
průměrná hodnota		282	266	269	247	241	238	220	225	215	235	229	225	236	233	247
směrodatná odchylka - $\sigma$		12	11	6,8	8,3	7,4	15	3,9	4,7	4,2	6	7,1	7,4	7,5	7,1	8,7

Tab. 25 - Hodnoty měření mikrotvrdości pro materiál 08CH18N10T – vzorek s LSP.

Závislost mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu je zaznamenána v grafu na následující straně, na obr. 55. Dále jsou v tomto grafu patrné rozdíly mezi hodnotami mikrotvrdości vzorků bez LSP a s LSP.



Obr. 55 - Závislost mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu pro materiál 08CH18N10T.

Z grafu měření mikrotvrdości pro materiál 08CH18N10T je patrné že LSP má vliv na zvýšení hodnot tvrdosti. Dále lze z grafu zjistit hloubku ve která ještě došlo ke zpevnění materiálu. U materiálu typu 08CH18N10T došlo ke zpevnění po celém průřezu vzorku, lze tedy konstatovat, že zpevňování tohoto typu materiálu pro průřez 2 mm je natolik efektivní, že dojde ke zpevnění skrze celou šířku vzorku.

### 11.3 Výsledky materiálu T552

Výsledky Měření pro vzorek z materiálu T552 bez LSP s označením C6 jsou patrné v tab. 26.

Mikrotvrdość HV 0,1 oceli T552 – bez LSP – vzorek C6																
vzdálenost od povrchu [ $\mu\text{m}$ ]	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	
řada	1	365	358	359	356	381	373	402	354	336	337	357	348	401	367	365
	2	349	345	356	345	341	346	349	356	341	349	348	352	337	376	361
	3	346	342	354	360	352	362	356	359	360	360	367	360	345	357	368
průměrná hodnota	353	348	356	354	358	360	369	356	346	349	357	353	361	367	365	
směrodatná odchylka - $\sigma$	8,3	6,9	2,1	6,3	17	11	24	2,1	10	9,4	7,8	5	28,5	7,8	2,9	

Tab. 26 - Hodnoty měření mikrotvrdości pro materiál T552 – vzorek bez LSP.

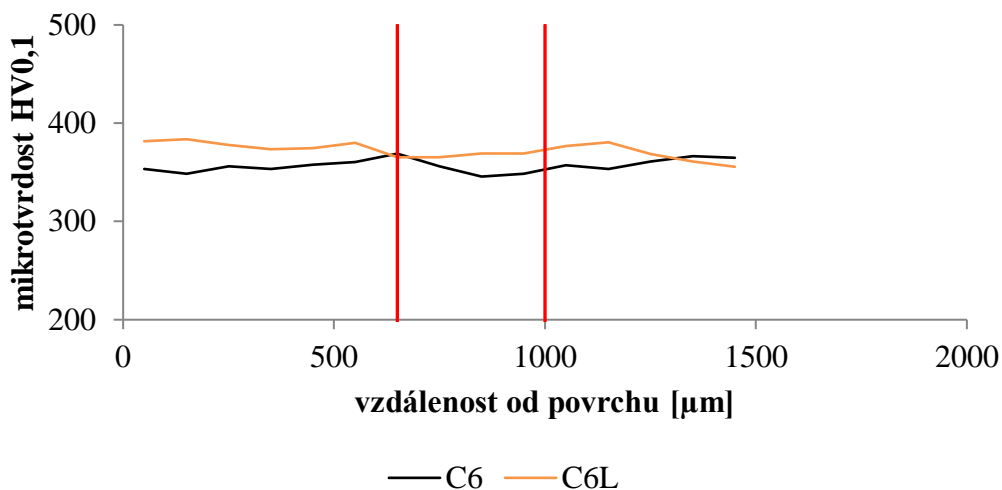
Výsledky Měření pro vzorek z materiálu T552 s LSP s označením C6 jsou patrné v tab. 27.

Mikrotvrdość HV0,1 oceli T552 – LSP – vzorek C6L																
vzdálenost od povrchu [ $\mu\text{m}$ ]	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	
řada	1	402	407	401	377	396	394	374	377	374	383	394	394	383	377	376
	2	366	371	371	367	363	370	370	373	376	359	360	369	352	349	342
	3	377	373	361	376	365	376	352	346	357	366	376	379	371	357	349
průměrná hodnota	382	384	378	373	375	380	365	365	369	369	377	381	369	361	356	
směrodatná odchylka - $\sigma$	15	17	17	4,5	15	10	9,6	14	8,5	10	13,9	10,3	12,8	11,8	14,7	

Tab. 27 - Hodnoty měření mikrotvrdości pro materiál T552 – vzorek s LSP.

Závislost mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu je zaznamenána v grafu na následující straně, na obr. 56. Dále jsou v tomto grafu patrné rozdíly mezi hodnotami mikrotvrdości vzorků bez LSP a s LSP.

## Mikrotvrдость - T552



Obr. 56 - závislost mikrotvrđosti na vzdálenosti od povrchu pro materiál T552.

Z grafu měření mikrotvrđosti pro materiál 08CH18N10T je patrné že LSP má opět vliv na zvýšení hodnot mikrotvrđosti. Dále lze z grafu zjistit hloubku zpevnění materiálu, která činí přibližně 650 μm. Avšak jednoznačné určení hloubku pro tuto konkrétní tavbu je značně problematické, neboť se jedná o martenzitickou ocel se značným obsahem vměstků ve své struktuře. Tyto vměstky mají vyšší tvrdost než základní matrice a při měření mikrotvrđosti mohlo dojít k indentaci právě těchto vměstků. Toto je patrné v grafu právě v hloubce 650 μm a 1100 μm, kdy došlo ke ztelnému nárůstu hodnot mikrotvrđosti. Dále je z grafu patrné, že při zpevnění pomocí LSP dochází k eliminaci těchto skokových změn mikrotvrđosti.

### 11.4 Závěr z měření

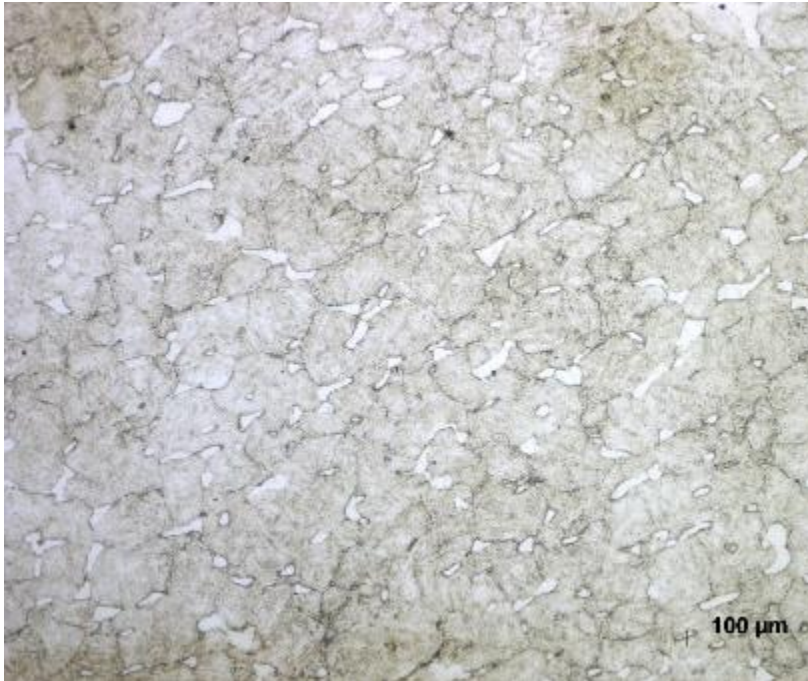
Měření mikrotvrđosti materiálů 14CH17N2, 08CH18N10T a T552 prokázalo nárůst mikrotvrđosti zpevněného materiálu oproti nezpevněnému materiálu. Největší nárůst hodnot nastal u materiálu 08CHN10T. Tento materiál taktéž vykazoval zpevnění v celém průřezu při použití vzorku o tloušťce 2 mm, a proto na závěrech tohoto měření lze konstatovat, že použití materiálu 08CH18N10T pro úpravu Laser Shock Peeningem v jaderných aplikacích je velmi efektivní a nejlepší volbou z testovaných materiálů z hlediska aspektu tvrdosti materiálu.



## 12 Mikrostruktura

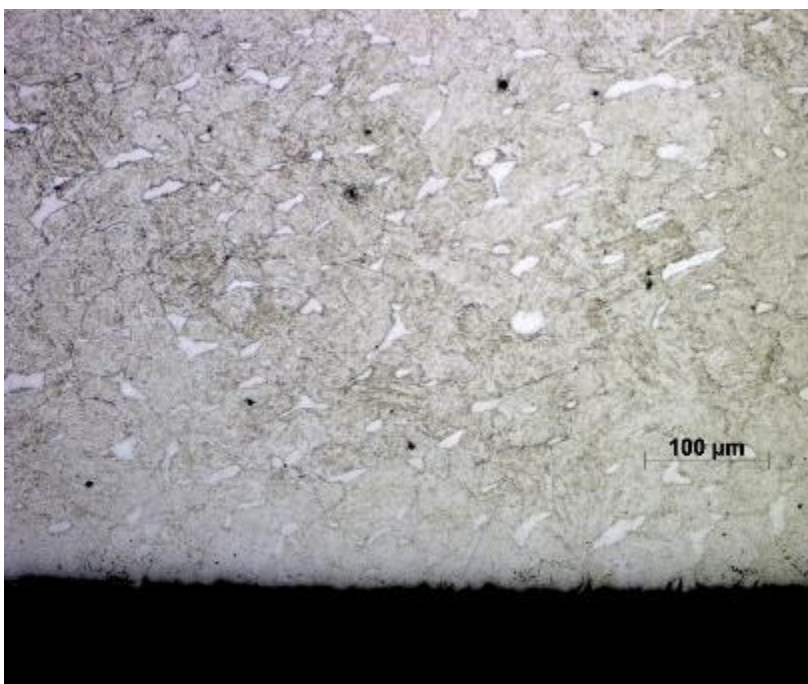
Mikrostruktura byla pozorována za účelem zjištění vlivů zpevňování pomocí LSP na velikost zrna základní matrice. Pro pozorování byl vytvořen příčný výbrus ze vzorků pro měření mikrotvrdosti a měření zbytkového napětí.

### 12.1 Mikrostruktura oceli 14CH17N2



Obr. 57 - mikrostruktura oceli 14CH17N2 bez LSP; 20x zvětšeno.

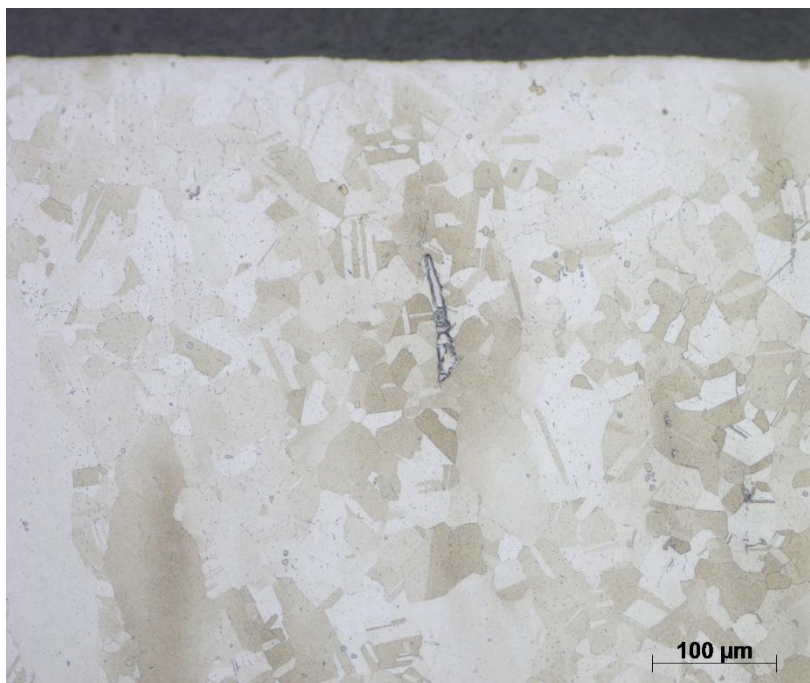
Z pozorování mikrostruktury oceli 14CH17N2 ve stavu zpevněném (na obr. 58) a nezpevněném (na obr. 57) je patrný rozdíl ve velikosti původních austenitických zrn. Vzorek, který nebyl zpevněn vykazuje větší zrna u povrchu než vzorek zpevněný.



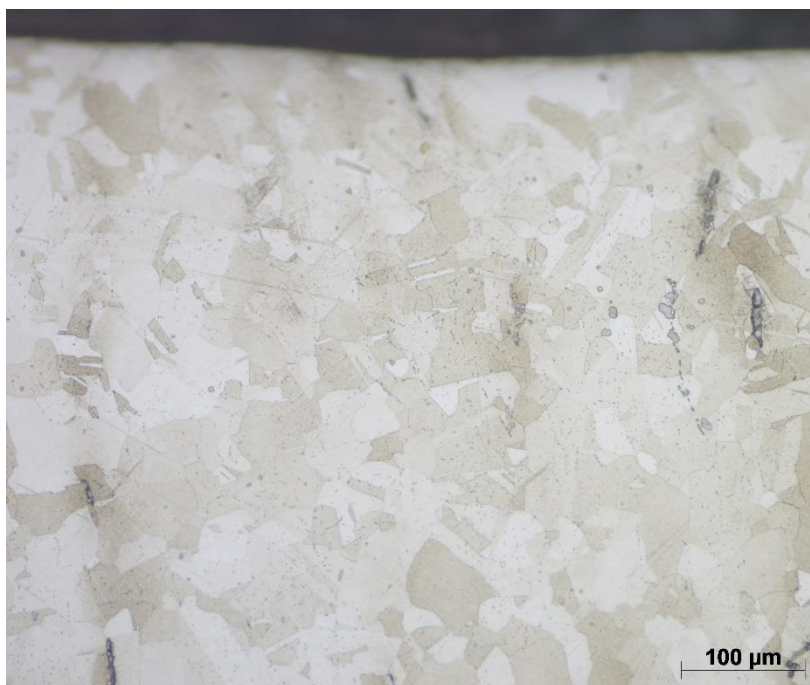
Obr. 58 - mikrostruktura oceli 14CH17N2 s LSP; 20x zvětšeno.



## 12.2 Mikrostruktura oceli 08CH18N10T



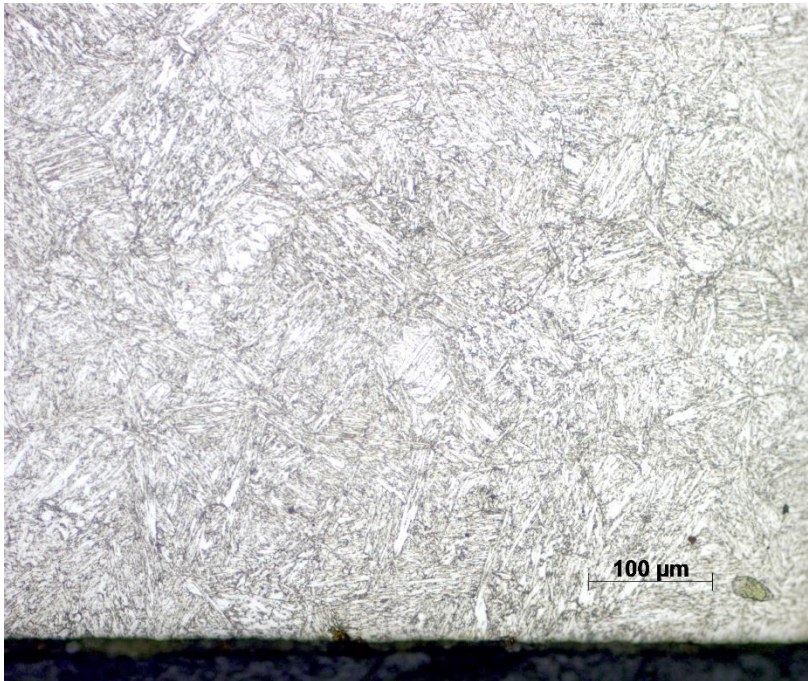
Obr. 59 - mikrostruktura oceli 08CH18N10T bez LSP; 20x zvětšeno.



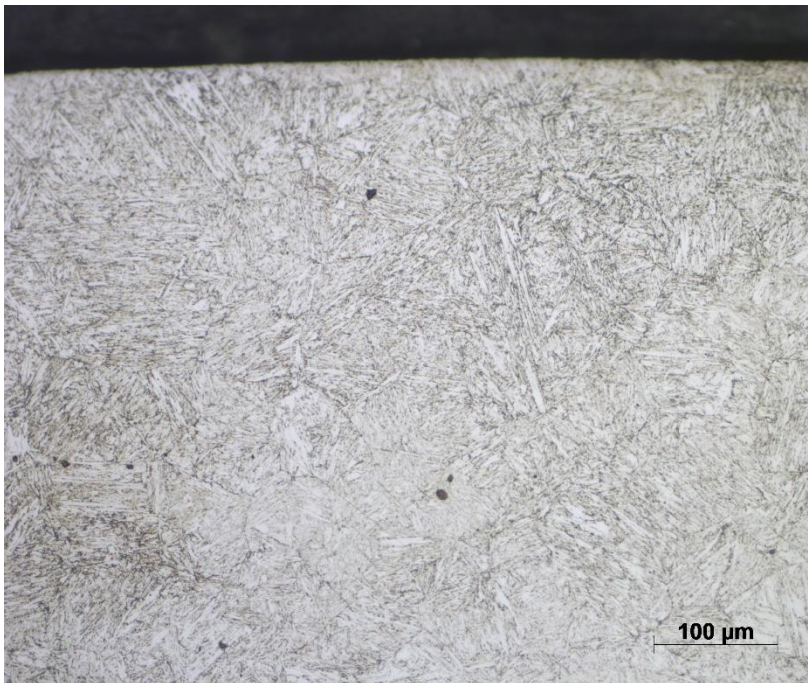
Obr. 60 - mikrostruktura oceli 08CH18N10T s LSP; 20x zvětšeno.

Z pozorování mikrostruktury oceli 08CH18N10T je patrný vliv zpevňování pomocí LSP na velikost austenitického zrna. Zpevněný vzorek (znázorněn na obr. 60) vykazoval jemnější zrna než vzorek nezpevněný (na obr. 59).

### 12.3 Mikrostruktura oceli T552



Obr. 61 - mikrostruktura oceli T552 bez LSP; 20x zvětšeno.



Obr. 62 - mikrostruktura oceli T552 s LSP; 20x zvětšeno.

U pozorování mikrostruktury materiálu T552 jsou na první pohled zrna hůře rozeznatelné, avšak po detailnějším zkoumání jsou lépe patrná. Vzorek na který bylo aplikováno zpevnění pomocí LSP (obr.62) vykazuje jemnější zrna, než vzorek nezpevněný (obr. 61).

### 12.4 Závěr z měření

Z pozorování mikrostruktury ocelí 14CH17N2, 08CH18N10T a T552 byl zjištěn vliv LSP na velikost zrna, u zpevněných vzorků se vyskytovaly zrna o menších velikostech. Lze vyvodit závěr, že zpevňování pomocí LSP má vliv na velikost zrna, jak bylo předpokládáno v kapitole 2.

### 13 Diskuse výsledků

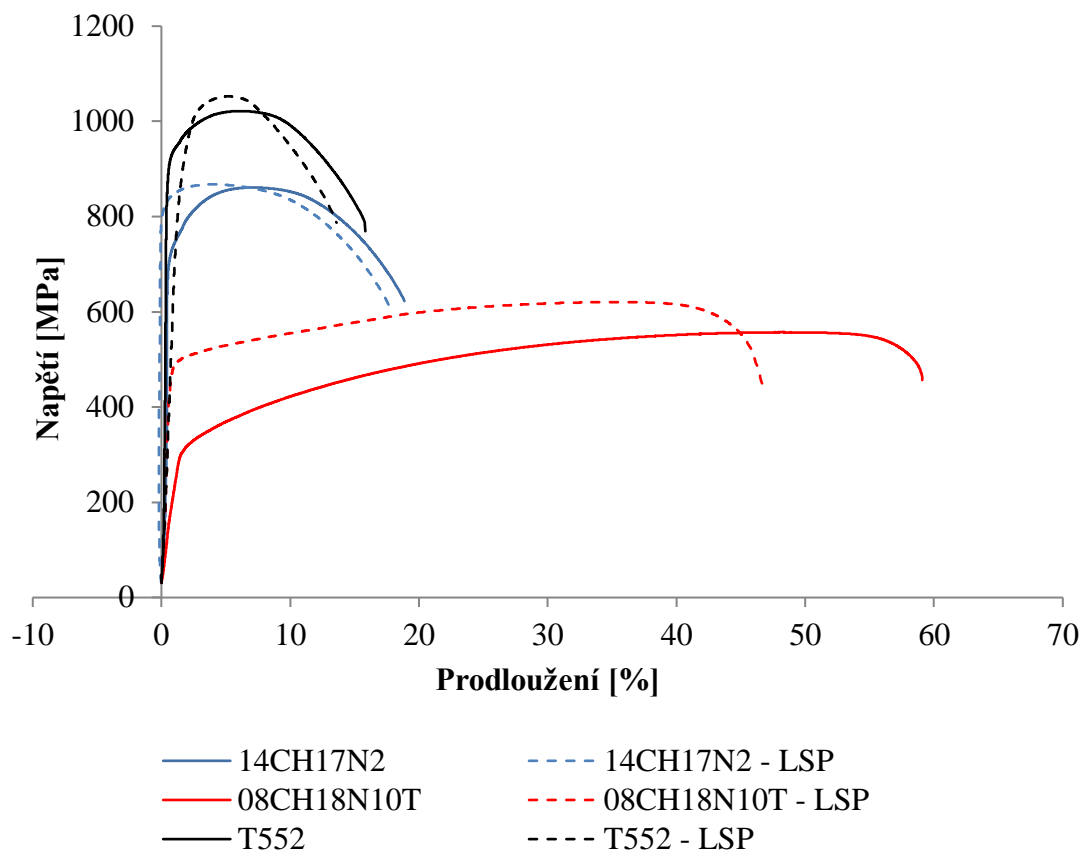
Výsledky tahové zkoušky				
označení vzorku	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>15</sub> [%]	Z [%]
A1	715	861	19	42
A2	707	864	20	34
A3	hodnoty neměřitelné – špatně vyrobený vzorek			
Směrodatná odchylka – $\sigma$	3,6	1,2	0,6	4,3
A4	677	870	17	38
A5	812	868	18	39
Směrodatná odchylka – $\sigma$	67,4	0,9	0,5	0,4
B1	227	564	60	56
B2	287	551	63	57
B3	267	557	57	55
Směrodatná odchylka – $\sigma$	24,9	5,2	2,1	0,8
B4	492	644	45	42
B5	470	621	46	47
Směrodatná odchylka – $\sigma$	11,2	11,5	0,9	2,6
C1	910	1022	16	37
C2	877	1016	16	37
C3	893	1008	17	38
Směrodatná odchylka – $\sigma$	13,6	5,4	0,6	0,7
C4	847,21	1035,98	12,7	36,33
C5	847,38	1052,44	12,46	31,69
Směrodatná odchylka – $\sigma$	0,1	8,2	0,1	2,3

Tab.28 - Přehledová tabulka výsledků tahové zkoušky všech materiálů.

Z přehledové tab. 28 jsou patrné rozdíly v hodnotách meze pevnosti, meze kluzu, kontrakce a tažnosti vzorků zpevněných a nezpevněných. Hodnoty tažnosti a kontrakce jsou po zpevnění nižší než před aplikací LSP. Tabulka dále obsahuje směrodatné odchylky pro každá materiálu a stav.



## Tahový diagram



Obr. 63 - Přehledový tahový diagram vybraných vzorků.

Do přehledového grafu tahové zkoušky byly vybrány vždy dva vzorky od každého materiálu, jeden ve stavu nezpevněném a druhý ve zpevněném stavu. Plná křivka znázorňuje vždy tahový diagram vzorku, který nebyl zpevněn a čárkovaná křivka vzorku, který byl zpevněn. Z grafu jsou patrné rozdíly v hodnotách mechanických vlastností vzorků bez zpevnění a se zpevněním. Dále je patrný rozdíl v hodnotách mechanických vlastností zvolených materiálů.

Při proměření vzorků před statickou zkouškou v tahu bylo zjištěno, že vyrobené vzorky, které byly dodány externím výzkumným ústavem nebyly vyrobeny v požadovaných geometrických a rozměrových tolerancích. Tyto nedostatky ovlivnily průběh měření zejména v počáteční fázi. Při zatěžování vzorků docházelo nejprve k jejich narovnání. Nutno podotknout, že na výsledky zkoušky tyto chyby neměly znatelný dopad a lze konstatovat, že měření poskytlo důvěryhodné výsledky.



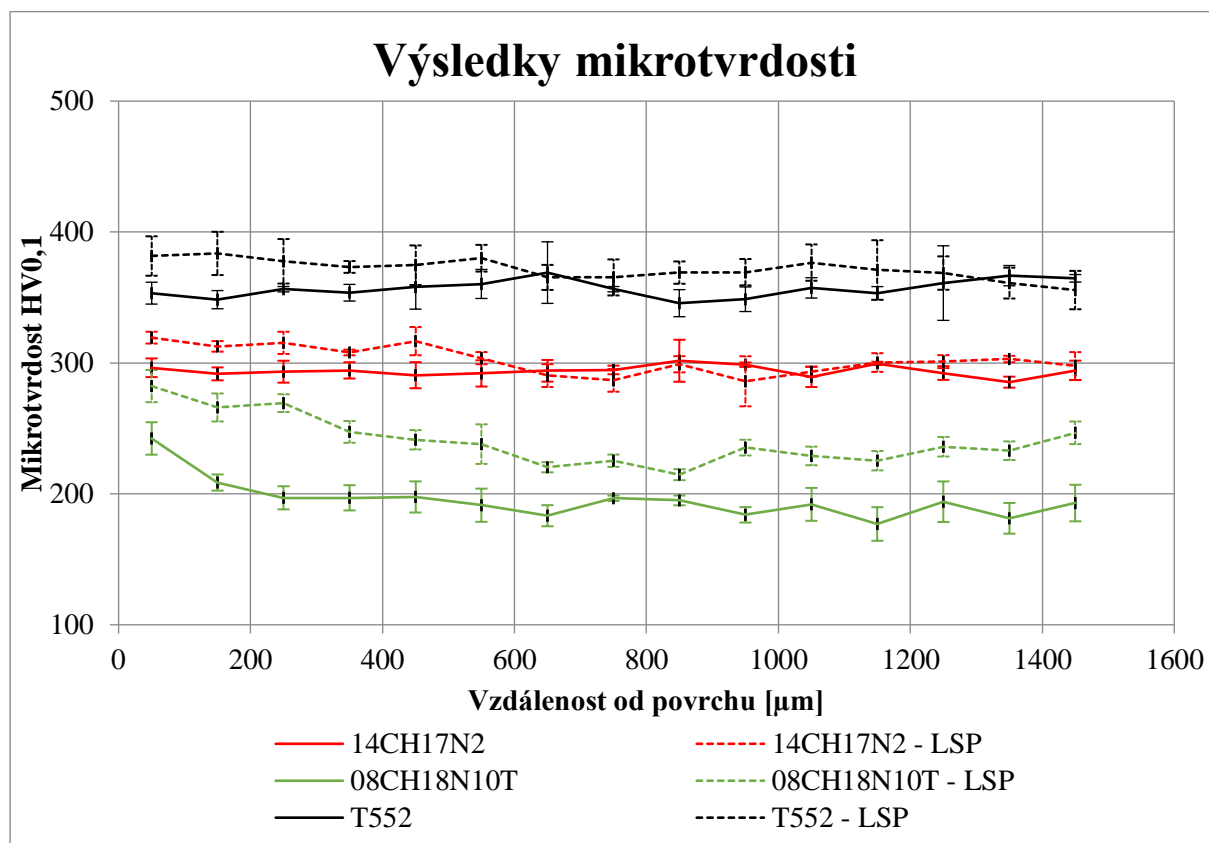
Výsledky měření zbytkového napětí [MPa]									
Zbytkové napětí [MPa]									
	14CH17N2			08CH18N10T			T552		
	bez LSP	s LSP		bez LSP	s LSP		bez LSP	s LSP	
		konvexní	konkávní		konvexní	konkávní		konvexní	konkávní
směr x	125	-168	-445	18	-62	-230	228	-317	-465
směr y	168	-134	-439	101	-97	-180	313	-545	-590
Směrodatná odchylna směru X – $\sigma_x$	9,2	7,3	78,9	23,9	29,7	43,5	21	38,4	18,1
Směrodatná odchylna směru Y – $\sigma_y$	8,9	7,9	17,5	25,9	32,1	26,5	41,9	23	29,1

Tab.29 - Přehledová tabulka výsledků měření zbytkového napětí pro všechny materiály.

V tab.29 jsou zapsány hodnoty zbytkového napětí, která byly zjištěny ve všech měřených směrech. Z těchto hodnot je patrný výskyt tlakového napětí ve vzorcích po zpevnění. Dále je z hodnot patrné, že strana, které byla zpevňována jako druhá (konkávní) vykazuje větší hodnoty tlakového napětí, než strana zpevňována jako první (konvexní). Tabulka dále také zobrazuje směrodatné odchylny.

Poznatkem z měření zbytkového napětí byla samotná metodika aplikace LSP, která neprobíhala současně na obou stranách vzorku. Nejprve docházelo ke zpevnění jedné strany a následně ke zpevnění strany druhé. Z tohoto důvodu docházelo k deformacím součásti a k rozdílným hodnotám tlakového napětí na straně konkávní a konvexní, pro příklad tento rozdíl u materiálu T552 činil 228 MPa. Tato metoda aplikace není pro průmyslovou praxi vhodná, neboť vysoké rozdíly ve zbytkovém napětí mohou způsobovat nežádoucí poruchy při provozování dané součásti.

Jako další metoda zjišťování zbytkového napětí by následovalo zkoumání hloubkového profilu pomocí odvrtávací metody. Jak již bylo zmíněno v úvodu do kapitoly 10, toto měření nemohlo být provedeno díky malým rozměrům vzorku. Odvrtávací metoda by mohla být nahrazena postupným odleptáváním povrchu, avšak z časových důvodů ve výzkumném ústavu HiLASE, kde bylo měření pomocí XRD prováděno, nebyla metoda odleptávání provedena.



Obr. 65 - Přehledový graf výsledků měření mikrotvrdomosti pro všechny materiály.

Graf na obr. 65 ukazuje výsledky měření mikrotvrdomosti pro všechny materiály a následně ukazuje závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu. Dále jsou v grafu znázorněny směrodatné odchylky pro každý měřený bod, pomocí níž je lépe patrný rozptyl měření. Čárkovanou čarou jsou v grafu zobrazeny výsledky vzorků, které byly zpevněny a plnou čarou jsou zobrazeny výsledky pro nezpevněné vzorky.

Lze pozorovat rozdílné hodnoty tvrdosti zpevněných a nezpevněných vzorků. Z výsledků je patrný určitý nárůst tvrdosti po provedení zpevnění. U materiálu 08CH18N10T je tento nárůst pozorovatelný v celé tloušťce vzorku, která byla 2 mm.

## 14 Závěr

Cílem experimentu této práce bylo vyhodnotit vlivy zpevňování kovových materiálů pomocí metody Laser Shock Peening a následný rozbor účinků na jednotlivé charakteristické mechanické vlastnosti dané oceli, jako jsou pevnost v tahu, únavová životnost a mikrotvrdość. Další zkoumaným aspektem byla hloubka dosahu zbytkového napětí, tedy hloubka, do které je Laser Shock Peening efektivní pro daný materiál.

Pro experiment byly vybrány tři materiály. Výběr materiálů byl zaměřen na možné použití v jaderném průmyslu a byly zvoleny oceli 14CH17N2, 08CH18N10T a T552. Ocel T552 je charakterizována především svým využitím jakožto materiál pro lopatky turbín konvenčních spalovacích elektráren a z tohoto důvodu byla do experimentu vybrána jako možný adept na uplatnění v jaderném průmyslu.

Z tahové zkoušky byl patrný nárůst meze pevnosti a meze tažnosti u vzorků, u kterých došlo ke zpevnění. U materiálu 08CH18N10T byl nejvíce patrný nárůst hodnot ze všech tří zkoumaných materiálů. U materiálu T552 došlo k nestandardnímu chování, kdy došlo k poklesu napětí na mezi kluzu, ale k nárůstu hodnot napětí na mezi pevnosti. Tento efekt mohl být způsoben relaxací napětí pod mezí kluzu a následným zpevněním, které zapříčinilo nárůst hodnot na mezi pevnosti. Toto tvrzení není jednoznačné a nemusí být stoprocentně správné. Pro přesné zjištění chování materiálu T552 při zkoušce tahem a následný vliv zpevňování na mechanické vlastnosti zjistitelné z tahové zkoušky bude potřeba provést opakovanou zkoušku na nové sadě vzorků, v širším počtu a lepší kvalitě.

Zkoumání lomových ploch bylo provedeno na vzorcích z tahové zkoušky a sloužilo jako doplněk k této zkoušce. Z pozorování lomových ploch byly pozorovány rozdíly u materiálu 08CH18N10T. U nezpevněného vzorku lze rozpoznat čířkový lom a u zpevněného vzorku byl pozorován lom smykový, který prochází skrz vzorek pod úhlem přibližně 45°. Lom smykový se vyskytuje nejčastěji u austenitických ocelí a ocelí s vyšší pevností. U materiálu T552 a 14CH7N2 nebyl pozorován rozdíl v lomových plochách před zpevněním a po zpevněním

Další zkouškou bylo měření únavové životnosti, které se v tomto případě provádělo pouze na vzorcích z ocelí 14CH17N2 a 08CH18N10T. Zkouška byla prováděna dle metodiky tříbodového ohybu. Z hodnot zjištěných z měření únavové životnosti bylo patrné, že zpevněné vzorky vykazovali vyšší napětí na mezi únavové životnosti než vzorky nezpevněné. I zde materiál 08CH18N10T vykazoval nejlepší zvýšení hodnot, kdy únavová životnost zpevněných vzorků byla zjiřřena při napětí 290 MPa a únavová životnost vzorků nezpevněných při 180 MPa

Měření zbytkového napětí u všech měřených materiálů prokázalo vliv zpevňování, neboť se ve všech vzorcích, na kterých bylo prováděno LSP, vyskytovalo tlakové napětí, které už z principů zpevňování bylo očekáváno. Největší nárůst residuálního tlakového napětí nastal u materiálu T552.

Měření mikrotvrdości u zkoumaných materiálů prokázalo nárůst hodnot tvrdości zpevněného materiálu oproti nezpevněnému materiálu. Největší nárůst hodnot nastal u materiálu 08CHN10T. Tento materiál taktěž vykazoval zpevnění skrze celou šířku průřezu při použití vzorku o tloušťce 2 mm a proto na závěrech tohoto měření lze konstatovat, že použití materiálu 08CH18N10T.



Zkoumání mikrostruktury prokázalo správné předpoklady, které byly zjištěny z provádění rešerše této práce. Vzorky, které byly zpevněny pomocí LSP vykazovaly jemnější zrna než vzorky, které nebyly zpevněny. Nutno podotknout, že pozorování mikrostruktury u oceli T552 bylo složitější, neboť správné pozorování velikosti zrna je zde složitější a na první pohled není velikost zrna patrná. Správné určení velikosti zrna je ovlivněno především subjektivním pohledem a provedeným leptáním.

Ze závěrů měření obsažených v této práci lze konstatovat její naplnění. Dále lze určit, že zpevnování metodou Laser Shock Peening prokázala zvýšené hodnoty mechanických vlastností na zpevněných vzorcích. Materiál 08CH18N10T ve srovnání s materiály 14CH17N2 a T552 lze považovat za nejvhodnější typ pro použití zpevnování metodou Laser Shock Peening za účelem docílení lepších mechanických vlastností u součástí aplikovaných v jaderném průmyslu.

## Zdroje

- [1] Abdullahi K. Gujba 1 and Mamoun Medraj - Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening
- [2] Clauer A.H, Gregory J.K, Rack H.j, and EYlon D.(eds) LaserShock peening for fatigue resistance. Proceeding of surface performance of titanium, TMS, Warrendale, PA. Metal Society of AIME, 217-30
- [3] Mohammad Ebrahimi & Saeid Amini & Seyed Mohammad Mahdavi - The investigation of laser shock peening effects on corrosion and hardness properties of ANSI 316L stainless steel
- [4] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8
- [5] Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement (MRP-267, Revision 2), EPRI Project, July 2016
- [6] Berg-Pollack F.-J. Voellmecke, C.M. Sonsino - Fatigue strength improvement by ultrasonic impact treatment of highlystressed spokes of cast aluminium wheels – international journal of fatigue - 2010
- [7] Massoud Malaki, Hongtao Ding – A review of ultrasonic peening treatment – Material and design; 2015
- [8] Dostupné z: <https://astanzalaser.com/q-switched-lasers> dne 28.11.2019
- [9] Chang Ye, Sergey Suslov, Dong Lin – Mechanical properties of copper subjected to cryogenic lasershock peening – Journal of applied physics 110, 2011
- [10] Josef Zrník, Libor Kraus, Tasilo Prnka, Karel Šperlink – Česká společnost pro nové materiály a technologie Oborová kontaktní organizace pro materiály, technologie a výrobní procesy COMTES FHT, s.r.o. – Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti
- [11] E. J. Lavernia. Material Science and Materials Engineering: A - Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing
- [12] K. Nakashima, M. Suzuki, Y. Futamura – Limit of Dislocation Density and Dislocation Strengthening in Iron – Materials Science Forum Vols. 503-504; Trans Tech Publications, Switzerland; 2006
- [13] R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe - Physics and applications of laser-shock processing – Journal of laser application 10 (1998)

- [14] Jaroslav VÁCLAVÍK, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN, Otakar WEINBERG - Czech Society for Nondestructive Testing - APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ
- [15] Journal of Stress Analysis Vol. 3, No. 2, Autumn - Winter 2018-19 - Presentation of Calibration Coefficient to Measure Non-Uniform Residual Stresses by the Integral Ring-core Method
- [16] Nikolaj Ganev, Ivo Kraus - Materials Structure, vol. 9, number 2 (2002) - X-ray diffraction measurement of residual stresses
- [17] James, M., Lu, J., Roy, G.: Handbook of measurement of residual stresses. SEM, Fairmont Press, INC., 1996, ISBN 0-88173-229-X.
- [18] Skálová J. Kovařík R. Benedikt V. - Základní zkoušky kovových materiálů, FST ZČU 2010, ISBN 978-80-7043417-8
- [19] Dostupné z [http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz\\_2017\\_2\\_ru.pdf](http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2017_2_ru.pdf) dne 10.10.2019
- [20] Pluhař J. Korita J - Strojírenské materiály, SNTL/ALFA, Praha 1982 – 3 vydání
- [21] Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive Materials Processing Volume 10, 2014, Pages 303-344
- [22] Dostupné z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/> dne 09.03.2020
- [23] Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/products/t552/> ; dne 09.03.2020
- [24] BREIDENSTEIN, a DENKENA. RESIDUAL STRESS DEPTH DISTRIBUTIONS IN UNCOATED, PVD COATED. Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, Germany: 2008.
- [25] Dostupné z <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody> dne 27.3.2020

## **Seznam příloh**

Příloha 1 – materiálové listy zvolených ocelí.

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 14CH17N2

Seite 1 / 2  
Page



BGH Edelstahl Freital GmbH

BGH Edelstahl Freital GmbH Am Stahlwerk 1 01705 Freital

Skoda JS A.S.

Orlik 226

31606 Plzen  
Tschechien

Kunden-Bestell-Nr. 866/BO/09  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. 59058001/109902  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. 296682  
Certificate no.  
No. de certificat

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204  
Certificate of material tests according to DIN EN 10204 3.1  
Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.  
Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.  
La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes Stempel des Werkstoffverständigen  
Trade mark Inspector's stamp  
Signe du fournisseur Poinçon de l'inspecteur



Erzeugnisform Product		Stab, rund, gedreht Round bars, turned											
Werkstoff / Quality		14Ch17N2											
Anforderungen Requirements		Ae 4114 Dok Rev. 4 05/07											
Besichtigung und Maßnachprüfung Inspection and dimensional control Inspection et contrôle de dimension ohne Beanstandung without objection				Erschmelzung/Nachbehandlung Meltingprocess/secondary refining Mode d'élaboration/traitement ultérieur E - VOD				Verwechslungsprüfung (spectroanalytisch) Identification test (spectral-analysis) examen d'identification (analyse spectrale) ohne Beanstandung without objection					
Pos. Item	Anzahl Quantity	Abmessung Dimension									Gewicht Weight kg	Schmelz-Nr. Heat-No.	
1	6	130,00 RD									2216	334643	
Schmelze Heat %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti	W	
334643	0,140	0,39	0,40	0,018	0,0010	16,18	0,18	1,57	0,08	0,035	0,004	0,045	
	Co												
	0,023												
Wärmebehandlungszustand Condition of heat treat Traitement thermique		vergütet Wärmebehandlung-Nr./ heat treatment lot-no.: 412/ 4224 hardened + tempered 1000°C Luft/ air + 720°C 6h Luft/ air + 700°C 12h Luft/ air											
Probe-Nr. Test-No.	Lage	Temp. °C	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 %	Z %	Kerbschlagarbeit Impact value J			Probenform Shape of test piece Charpy-V °C	Härte Hardness HB		
Soll/Req.	L	RT	>=490	>=686	>=15	>=40	>=59			RT	>=207		
	L						>=47			RT	<=285		
	L	+350	>=343	>=441									
162FD1	L	RT	560	776	19	60	128	126	120	RT	245-250		
162FD1	L	RT					123	116	96	RT			
162FD2	L	RT	563	774	19	60							
162FD1	L	+350	470	621	17	55							
+ = KCU Typ 1 GOST 9454-78 * = KV Typ 11 GOST 9554-78													
US-Prüfung/ us-test DIN EN 10308 03/02 Tab.1 - Typ 1a (vollständig-complete) Tab.2 - Qual.Kl.4: ohne Beanstandung- no objection.													
Anlagen Encl. Annexe	US-certificate / Protokoll Glühbesch.der Referenzbehandlung Heat treatment cert. reference				Freital, den Place and date Lieu et date 17-JUL-09				Abnahmebeauftragter Inspector representative Inspecteur de réception <b>Kadner</b>				
Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.													

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 14CH17N2

Seite 2 / 2  
Page



BGH Edelstahl Freital GmbH

BGH Edelstahl Freital GmbH Am Stahlwerk 1 01705 Freital

Skoda JS A.S.

Orlik 226

31606 Plzen  
Tschechien

Kunden-Bestell-Nr. 866/BO/09  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. 59058001/109902  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. 296682  
Certificate no.  
No. de certificat

Bescheinigung über Werkstoffprüfung nach DIN EN 10204  
Certificate of material tests according to DIN EN 10204 3.1  
Certificat des essais des matériaux selon DIN EN 10204

Die Lieferung entspricht den vereinbarten Lieferbedingungen.  
Delivery in accordance with the agreed terms of delivery.  
La livraison correspond aux conditions de livraison convenues.

Zeichen des Lieferwerkes Stempel des Werksachverständigen  
Trade mark Inspector's stamp  
Signe du fournisseur Poinçon de l'inspecteur



Mechanische Eigenschaften an Referenzproben/ mech. properties reference test pieces:

Temp. °C	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 %	Z %	KCU+ RT °C J/cm <sup>2</sup>	KV-V* RT °C J	HB
Soll: RT	>=784	>=1079	>=10	>=30	>=39	>=15	321-432
+350	-	-	-	-	-	-	-

162FD1 RT	896	1110	17	54	80 85 78	26 29 25	337
162FD1 +350	824	936	14	56			

IK-Beständigkeit/ intercrystalline corrosion GOST 6032:  
wird gewährleistet- is warrented.

Makrostruktur/ macrostruture: ohne Beanstandung- no objection.

Vergütet auf niedrigste Festigkeit - mit Referenzproben HB 321-432  
Hardened + tempered to minimal tensile strenght - with reference test pieces HB 321-432

Stablänge/ length of bar: 3,30 - 3,84 m

Die Lieferung entspricht den technischen Bedingungen Ae 4114/ Dok Rev.4  
The delivery is according to spec. Ae 4114/ Dok Rev.4

Anlagen US-certificate / Protokoll  
Encl. Glühbesch.der Referenzbehandlung  
Annexe Heat treatment cert. reference

Freital, den  
Place and date  
Lieu et date  
17-JUL-09

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
Kadner

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.



# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 14CH17N2

Seite 1 / 1  
Page

**Ultraschallprüfung**  
Ultrasonic testing

EN 102043.1



**BGH Edelstahl Freital GmbH**

Kunden-Bestell-Nr. **866/BO/09**  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **590580-01**  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. **296682**  
Certificate no.  
No. de certificat

Erzeugnisform	: Stab, rund, gedreht
Product	: Round bars, turned
Werkstoff/Quality	: 14Ch17N2 charge: 334643
Abmessung/Dimension	: 130,00 RD
Anzahl/Quantity	: 6 <span style="margin-left: 100px;">Gewicht /Weight : 2216 kg</span>
Wärmebehandlungszustand	: vergütet Wärmebehandlung-Nr./ heat treatment lot-no.: 412/4224
Condition of heat treat	: hardened + tempered
Traitement thermique	: 1000°C Luft/ air + 720°C 6h Luft/ air + 700°C 12h Luft/ air
<b>Prüfrichtlinie</b>	
Specification	
US: nach KDV	
Ae 4114 Dok/Rev. 4	
Bearbeitungszustand	: gedreht
Machining condition	turned
Prüfgerät	: Krautkrämer USM 3S
Test equipment	
Prüfkopf	: MB2S MWB45-2
Probe	
Kopplungsmittel	: Wasser/Leim
Coupling medium	water/glue
Prüfumfang	: gesamter Umfang - gesamte Länge
Extent of examination	total circumference - total length
Einschallrichtung	: Senkrechteinschallung-gesamte Länge-gesamter Umfang
	Winkleinschallung 45°-gesamte Länge-
	gesamter Umfang-beide Achsrichtungen
Direction of incidence	perpendicular incidence-total length-total circumference
	oblique incidence 45°-total length-
	total circumference-both axle direction
Registriergrenze	:
Registration level	
Registr./Zuläss.-gr.	: Prüfung und Justierung erfolgten gemäß obiger Spezifikation
Register./acceptance level	Test and adjustment acc.to a.m.specification. specification
Befund	: keine registrierpflichtigen Anzeigen
Result	no reportable indications
Prüfdatum	: 16.07.2009
examination date	

Freital, den  
Place and date  
Lieu et date  
17.07.09

Prüfer  
Testing operator  
Opérateur  
Mittag  
Stufe 1 EN 473

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
JUNGKUNZ  
Stufe 3 DIN EN 473



Überwacher  
Supervisor  
Surveilleur

Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 14CH17N2

## Wärmebehandlungsbescheinigung

Heat treatment certificate

Attestation de traitement thermique



BGH Edelstahl Freital GmbH

Kunden-Bestell-Nr. **866/BO/09**  
Customer order no.  
Cde. no. du client

BGH-Auftrags-Nr. **59058001**  
BGH works no.  
BGH référence

Zeugnis-Nr. **296682**  
Certificate no.  
No. de certificat

Wärmebehandlungszustand: **Referenzwärmebehandlung Pr.Nr. 162FD Charge: 334643**  
Condition of heat treatment: **vergütet/hardened + tempered**  
État de traitement thermique: **trempe et revenu**

Datum:  
Date: **09.07.2009**  
Date:

Ofen-Nr.:  
Furnace no.: **400**  
No. du four:

Aufheizzeit:  
Heating up time: **80 min**  
Temps de montée en température:

Haltemperatur:  
Holding temperature: **1000 °C**  
Température de maintien:

Haltezeit:  
Holding time: **30 min**  
Temps de maintien

Abkühlmedium:  
Quenching medium: **Öl / oil / huile**  
Moyen de refroidissement:

Datum:  
Date: **09.07.2009**  
Date:

Ofen-Nr.:  
Furnace no.: **400**  
No. du four:

Anlaßtemperatur:  
Tempering temperature: **540 °C**  
Température de revenu:

Haltezeit:  
Holding time: **120 min**  
Temps de maintien:

Abkühlmedium:  
Quenching medium: **Luft / air / air**  
Moyen de refroidissement:

Wärmebehandlungs-Nr.:  
Heat treatment lot no.:  
No. du lot de traitement thermique:

**We confirm heat treatment acc. to Ae 4114/Dok Rev 4.**  
**The type of furnace is muffle furnace.**

Diagramm:  
Diagram:  
Diagramme:

Datum:  
Date: **17.07.2009**  
Date:

Abnahmebeauftragter  
Inspector representative  
Inspecteur de réception  
**JUNGKUNZ**



Das Zeugnis wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

This certificate was generated by data system it must not be signed for validity as well.  
Ce certificat a été établi sur système informatique et est valable sans signature aussi.



# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T



**ZVU Kovárna a.s.**  
Pražská třída 322/4  
500 04 Hradec Králové

Prodávající je zapsán v obchodním rejstříku vedeného Krajským soudem v Hradci Králové oddíl B, vložka 2599

## ZKUŠEBNÍ PROTOKOL / INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT WERKSZEUGNIS / ABNAHMEPRÜFZEUGNIS TEST REPORT / INSPECTION CERTIFICATE

ČSN EN 10 204 / 3.1

Číslo / No. / Nr.: 2015/462

Kupující Customer Kunde	Objednávka č. Purchase order No. Kundenbestellnummer	Zakázkové číslo / položka Shop order No. / Serial No. Werkauftragsnummer / Produktionsnummer		
Škoda JS a.s.  Orlík 266 316 06 Plzeň	4902/BO/14	KS-14/1905 / 3344		
Množství Quantity Menge	Název výrobku Designation of Article Bezeichnung des Erzeugnisses	Jakost Quality Werkstoff	Číslo tavby Heat No. Schmelze Nr.	Zkušební předpisy / Požadavky Test Prescription / Requirements Prüfgrundlagen / Anforderungen
6	Výkovek-tyč KR 180 Rozměr: pr.180+1 x celkem 1845 kg	08CH18N10T A	474322	Ae 5375/DOK. Rev.3

### TAVEBNÍ ANALÝZA / HEAT ANALYSIS / SCHMELZANALYSE (v/ln % nebo/or/oder ppm)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	Nb	N	W	B	Co	H	O	Ca
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm	ppm
-	1	-	-	-	17	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,08	2	0,8	0,035	0,02	19	11	0,3	0,3	-	0,7	-	-	500	-	-	0,05	-	-	-
0,05	1,68	0,57	0,02	0,001	17,5	9,9	0,06	0,06	-	0,47	0,08	-	120	0,02	-	0,03	0	-	-

Výrobce oceli / Steel producer / Stahlhersteller : **ŽDAS, a.s.**

Č.zk. Test No. Probe Nr.	Směr Direction Probelage	Teplota zk. Testing temp. Prüftemp. °C	Mez kluzu Yield stress Streckgrenze MPa	Pevnost Tensile strength Zugfestigkeit MPa	Tažnost Elongation Dehngrenze A: L = 5d B: L = 2" %	Kontrakce Reduction Einschnürung %	Teplota zk. Testing temp. Prüftemp. °C	Vrbová houževnatost Energy of impact Kerbschlagzähigkeit	Tvrdość Hardness Härte
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E 148-1	L	20	248	565	A 54,5	76	-	-	-
E 148-1	L	350	213	425	A 31	69	-	-	-
E 148-1	L	350	206	404	A 28	70	-	-	-
E 148-2	L	20	265	565	A 54	73	-	-	-
E 148-2	L	350	235	414	A 29,5	72	-	-	-
E 148-2	L	350	233	412	A 29,5	73	-	-	-

Značení: Marking: Kenzeichnung:	Materiál, Tavba, Č. zkoušky, Č. výkovku Material, Heat No., Test No., Forging No. Werkstoff, Schmelze, Probe Nr., Schmiedstück Nr.	Značka výrobce, příjematele: Mark of factory, factory inspector: Hersteller- und Sachverständigenkennzeichen:	<b>ZVK</b>
---------------------------------------	--	---	------------

Poznámky: Požadavky na materiál podle Ae 5375/DOK. Rev.3 jsou splněny.  
Notes: Zkouška na mezikrystalovou korozi vyhovuje dle GOST 6032-03 metoda AM.  
Bemerkungen: Značení : ZVK 08CH18N10T 474322 E 148 + p.č. 1-6.

Dodané výrobky jsou v souladu s požadavky objednávky.  
Delivered products comply with the requirements of the order.  
Die gelieferten Produkte entsprechen vollkommen der Anforderungen in der Bestellung.

ZVU Kovárna a.s.  
ÚŘJ - výrobní kontrola 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 03219514

ZVU Kovárna a.s.  
ÚŘJ - výrobní kontrola 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 03219514

20.3.2015

Datum / Date

Razítko a podpis výrobní kontroly  
Stamp of factory inspector  
Stempel des Werkssachverständigen



# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T



**ZVU Kovárna a.s.**  
Pražská 322  
Hradec Králové

## PŘÍLOHA CERTIFIKÁTU ZEUGNISSE ANLAGE SUPPLEMENT OF CERTIFICATE

ČSN EN 10 204 / 3.1

Číslo / Nr. / No.:

2015 / / 462

Zákazník Kunde Customer	Objednávka č. Auftrags Nr. Order No.	Zakázkové číslo / Evidenční číslo Bestell Nr. / Werks. No. MFGR's Job No. / Works No.		
ŠKODA JS a.s.	4902/BO/14	KS-14/1905/3344		
Množství Menge Quantity	Název Výrobku Bezeichnung des Erzeugnisses Designation of Article	Jakost Werkstoff Quality	Číslo tavby Schmelze Nr Heat No.	Zkušební předpisy / Požadavky Prüfgrundlegen / Anforderungen Test prescription / Requirements
6	Výkovek-tyč KR 180 Rozměr: pr.180+1 x celkem 1845 kg E 148	08Ch18N10T A	474322	Ae 5375/DOK. Rev.3

### Znečištění nekovovými vměstky dle GOST 1778-70-metoda Š4

Číslo vzorku	Řádkové kysličníky	Bodové kysličníky	Křehké křemičitany	Tvárné křemičitany	Nedeformující se křemičitany SN	Sírníky	Nitridy a karbonitridy řádkové NS	Nitridy a karbonitridy bodové NT	Nitridy hliníku NA
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	2,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	0,0
<b>Součet</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,50</b>	<b>2,00</b>	<b>0,00</b>

**Delta ferit:**

3,50%

**Velikost zrna dle GOST 5639-82:**

G= 5 (srovnávací metoda)

**Makrostruktura:**

bez trhlin, rozvrstvení, ředin, pórů, bublin, strusky, vměstků apod.

Povrchová a rozměrová kontrola /na výrobu jsou vyhovující  
Besichtigung und Abmesong: o. B. / Die gestellten Anforderungen sind erfüllt  
Surface und dimensional inspection: w. O. / Manufacturing requirements are fulfilled

20.3.2015

Razítko a podpis výrobní kontroly  
Stempel des Werksachverständigen  
Stamp of factory inspector

ZVU Kovárna a.s.  
ÚŘJ - výrobní kontrola 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 38219514

ZVU Kovárna a.s.  
ÚŘJ - výrobní kontrola 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 38219514

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T



ZVU Kovárna a.s.  
Pražská třída 322/4  
500 04 Hradec Králové

## PROTOKOL O ZKOUŠCE ULTRAZVUKEM ULTRASONIC TESTING REPORT ULTRASCHALLPRÜFUNGSZEUGNIS

Číslo / No. / Nr.: 2015/158

Kupující Customer Kunde	Objednávka č. Purchase order No. Kundenbestellnummer	Zakázkové číslo / položka Shop order No. / Serial No. Werksauftragsnummer / Produktionsnummer		
Škoda JS a.s.  Orlík 266 316 06 Plzeň	4902/BO/14	KS-14/1905 / 3344		
Množství Quantity Menge	Název výrobku Designation of Article Bezeichnung des Erzeugnisses	Jakost Quality Werkstoff	Číslo tavby Heat No. Schmelze Nr.	Rozsah zkoušení Testing volume Prüfumfang
6	Výkovek-tyč KR 180 Rozměr: pr.180+1xcelkem 1845 kg	08CH18N10T A	474322	100 %
	Číslo výkresu / Drawing No. Zeichnungsnummer	Zkouška před Test before Prüfung bevor	<input type="checkbox"/> po after nach	<input checked="" type="checkbox"/> tep. zpracování heat treatment Wärmebehandlung

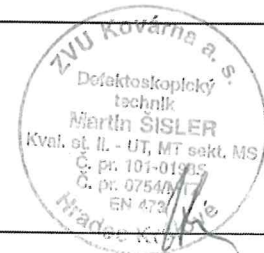
Vyhodnocení / přípustnost dle // Evaluation / Acceptance to // Bewertung / Abnahmekriterien		<b>Ae 5375/DOK. Rev.3</b>	
Přístroje: Equipments: Prüfgeräte:	Olympus Epoch 600	Nastavení citlivosti: Sensitivity adjustment: Empfindlichkeitseinstellung:	DGS scale
Frekvence: Frequency: Frequenz:	2 MHz	Registrační hranice: Register size: Registrierergrenze:	3,6 mm
Typ sondy: Search unit: Prüfkopf:	B2S, WB 45-1	Kalibrační měrka: Calibration etalon: Eichblock:	K 1
Stav povrchu: Surface condition: Oberflächenzustand:	obroben	Vazba: Couplant: Kopplungsmittel:	Olej

### Výsledek zkoušky / Test result / Prüfergebnis

6 x vyhovuje dle Ae 5375/DOK. Rev.3


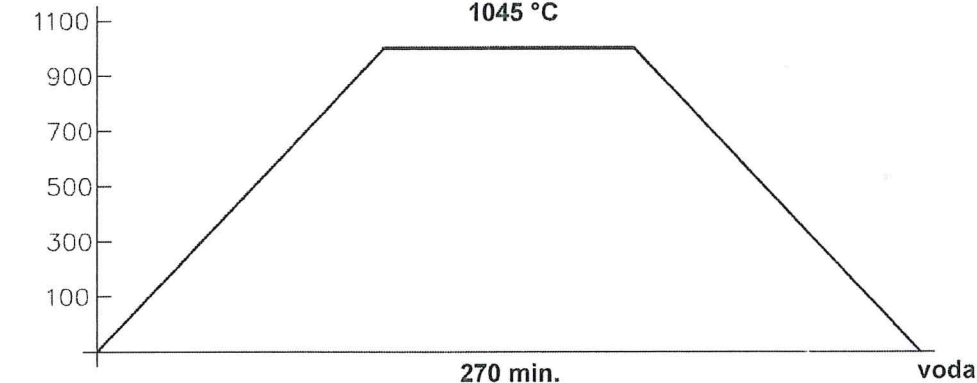

Poznámky:  
Notes:  
Bemerkungen:

Zkoušel / Operator: Prüfer: <b>Šisler M.</b>	Kval. stupeň / Level: Qualifikation: <b>II dle EN 473</b>	Schválil / Approved: Genehmigt:
Datum: Date: <b>20.3.2015</b> Datum:	Místo zkoušky: Examination: Prüfungsort: <b>ZVU Kovárna a.s. Hradec Králové</b>	<b>Šisler M.</b>





# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T

 <p>ZVU Kovárna a.s. Pražská 322, P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové</p>	<p>OSVĚDČENÍ O TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ BESCHEINIGUNG ÜBER WÄRMEBEHANDLUNG CERTIFICATE OF HEAT TREATMENT СЕРТИФИКАТ О ТЕРМООБРАБОТКЕ Dle / Nach / To / Для EN 10204 / 3.1</p>		
Číslo / Nr. / No. / Номер: <b>2015/094</b>	Datum / Date / Дата: <b>8.2.2015</b>		
Kupující / Kunde / Customer / Заказчик	Škoda JS a.s.		
Zakázkové číslo / Bestelungs Nr. / MFGR's Job No. / Заказной номер	KS-14/1905		
Běžné číslo / Lfd. Nr. / Serial No. // Množství / Menge/ Quantity	3344 / 1-3 KS		
Číslo objednávky / Auftrags Nr. / Order No.	4902/BO/14		
Název části / Benennung des Teils / Name of Part / Название части	výkovek-tyč KR 180, mat.08CH18N10T		
Číslo výkresu / Zeichnungs Nr. / Drawing No. / Номер чертежа	NÁČ.3344/KOV		
Materiál / Material / Материал // Tavná / Schmelze / Heat / Плавка	08CH18N10T / 474322		
Návodka č. / Vorgehensweise Nr. / Procedure No. / Инструкция Ио.			
Číslo pece / Ofen Nr. / Furnace No. / Но. печи	Vozová žíhací pec P175		
<p>DIAGRAM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ DIAGRAM DER WÄRMEBEHANDLUNG HEAT TREATMENT DIAGRAM ДИАГРАММА ТЕРМООБРАБОТКИ</p> 			
Způsob tepelného zpracování / Art der Wärmebehandlung / Method of Treatment / Способ термообработки			
<b>Austenitizace / Lösungsglühen / Solution Annealing</b>			
Způsob ochlazování / Art der Abkühlung / Method of cooling / Способ охлаждения			
<b>Voda / Wasser / Water</b>			
Hodnoty tvrdosti / Hodnoty tvrdosti / Hardness test / Величины твердости			
<b>po tepelném zpracování / nach Wärmebehandlung / after heat treatment</b>			
Typ přístroje / Type des Gerätes / Type of instrument / Тип аппарата			
<b>Brinell (HBW 10/3000)</b>			
Základní materiál / Grund material / Base Material / Основной материал			
Přechodové pásmo / Übergangsgebiet / H. A. Z. / Зона терм. влияния			
Svarový kov / Schweissgut / Weld material / Наплавл. металл			
Poznámky / Anmerkungen / Notes / Примечания:			
Zařízení pro tepelné zpracování bylo přezkoušeno dle předpisu: Anlage für Wärmebehandlung wurde überprüft nach: <b>(AD-Merkblatt HP 7/1 Abz. 3.</b> Device for Heat treatment was approved as may by required:			
Die gestallen Anforderungen sind erfüllt Manufacturing requirements are satisfied			
Vystavil / dne Auggestellt von / am Prepared by / date Выписал / дня	 <p>ZVU Kovárna a.s. útv. výroby Pražská 322 501 47 Hradec Králové IČ: 63219514</p> <p><b>16.2.2015</b></p>	Kontroloval / dne Überprüft von / am Approved by / date Проверил / дня	<p>ZVU Kovárna a.s. ÚřJ - svařovací technik 1 Pražská 322 501 47 Hradec Králové IČ: 63219514</p> <p><b>20-02-2015</b></p>

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T

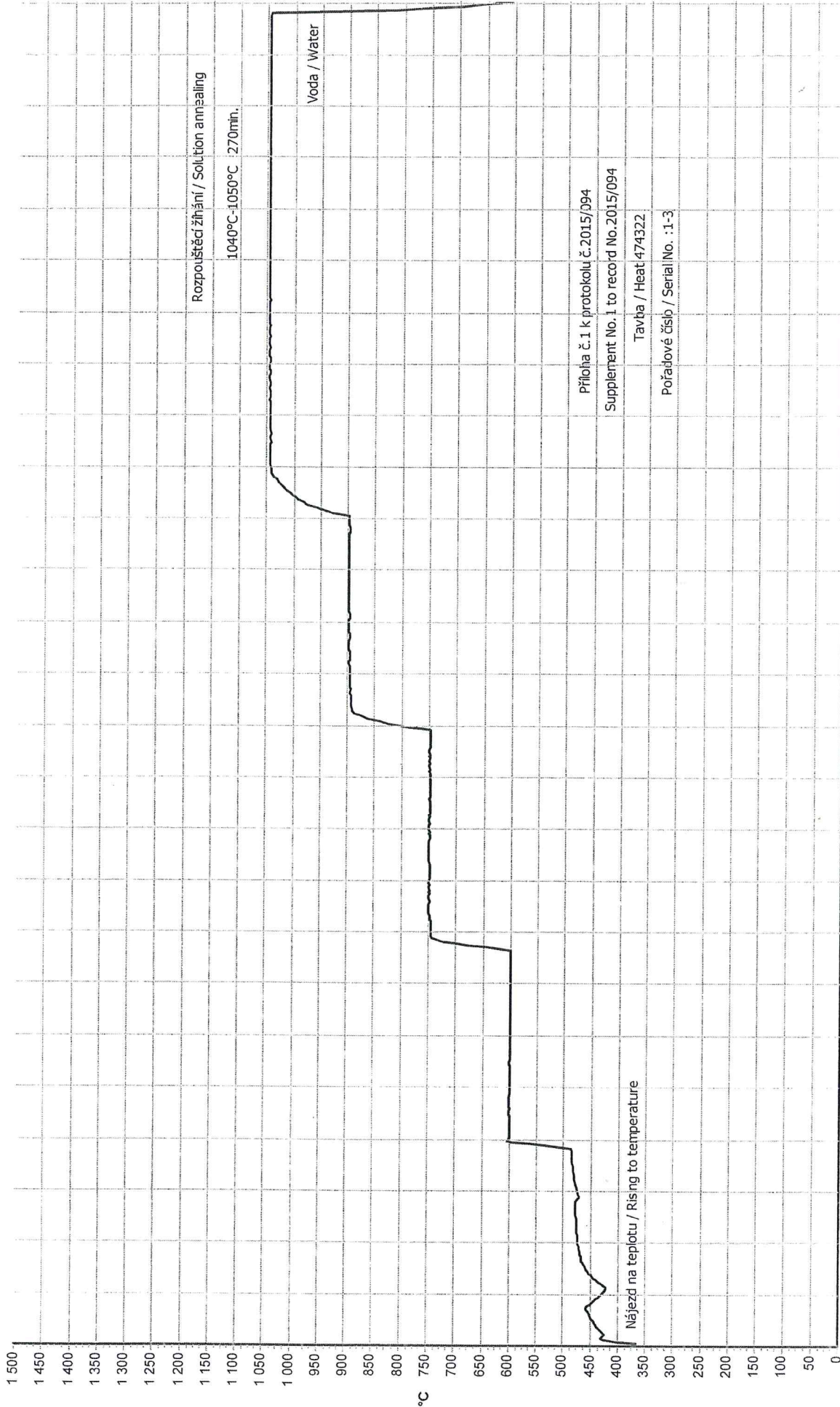


ZVU Kovárna a.s.  
Pražská třída 322/4  
500 04 Hradec Králové

## Diagram tepelného zpracování

Zakázkové číslo : KS-14/1905 - 3344    Objednávka odobratele: 4902/BO/14  
Výrobek : výkovek-tyč KR 180, mat.08CH18N10T  
Materiál : 08CH18N10T

Odběratel : Škoda JS a.s.  
Orlík 266  
316 06 Pízeň



8.2.2015  
20:18:00

1 dílek = 0.5 hod.

9.2.2015  
9:19:00

ZVU Kovárna a.s.  
Úřk. - zabezpečení technik 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 63219514

ZVU Kovárna a.s.  
Úřk. - zabezpečení technik 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 63219514

Vypracoval : Radek Kamenický

ZVU Kovárna a.s.  
Úřk. - zabezpečení technik 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 63219514


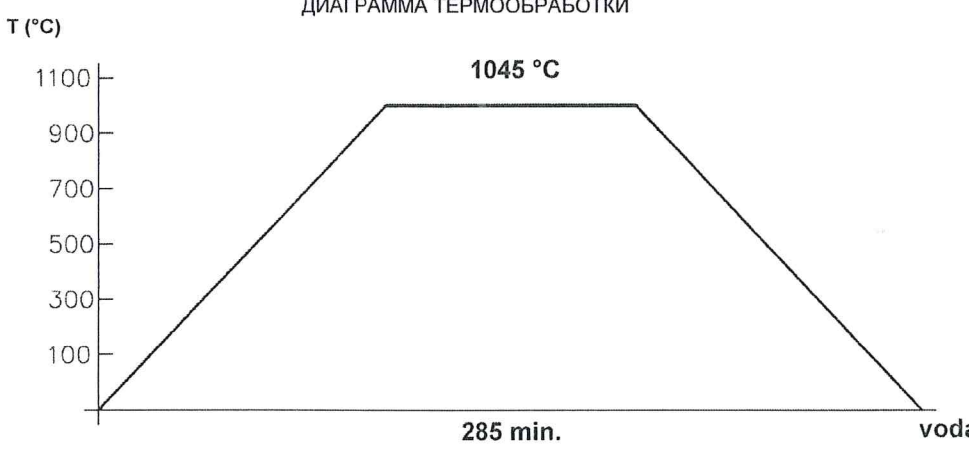
ZVU Kovárna a.s.  
Úřk. - zabezpečení technik 1  
Pražská 322 P.O.Box 21  
501 47 Hradec Králové  
IČ: 63219514

1 dílek = 0.5 hod.

9.2.2015  
9:19:00



# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T

 <p>ZVU Kovárna a.s. Pražská 322, P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové</p>	<p style="text-align: center;">OSVĚDČENÍ O TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ BESCHEINIGUNG ÜBER WÄRMEBEHANDLUNG CERTIFICATE OF HEAT TREATMENT СЕРТИФИКАТ О ТЕРМООБРАБОТКЕ</p> <p style="text-align: center;">Dle / Nach / To / Для EN 10204 / 3.1</p>		
Číslo / Nr. / No. / Номер: <b>2015/095</b>	Datum / Date / Дата: <b>10.2.2015</b>		
Kupující / Kunde / Customer / Заказчик	Škoda JS a.s.		
Zakázkové číslo / Bestelungs Nr. / MFGR's Job No. / Заказной номер	KS-14/1905		
Běžné číslo / Lfd. Nr. / Serial No. // Množství / Menge/ Quantity	3344 / 4-6 KS		
Číslo objednávky / Auftrags Nr. / Order No.	4902/BO/14		
Název části / Benennung des Teils / Name of Part / Название части	výkovek-tyč KR 180, mat.08CH18N10T		
Číslo výkresu / Zeichnungs Nr. / Drawing No. / Номер чертежа	NÁČ.3344/KOV		
Materiál / Material / Материал // Tavba / Schmelze / Heat / Плавка	08CH18N10T / 474322		
Návodka č. / Vorgehensweise Nr. / Procedure No. / Инструкция Ио.			
Číslo pece / Ofen Nr. / Furnace No. / Но. печи	Vozová žihací pec P175		
<p>DIAGRAM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ DIAGRAM DER WÄRMEBEHANDLUNG HEAT TREATMENT DIAGRAM ДИАГРАММА ТЕРМООБРАБОТКИ</p>  <p style="text-align: center;">1045 °C</p> <p style="text-align: center;">285 min.      voda</p>			
Způsob tepelného zpracování / Art der Wärmebehandlung / Method of Treatment / Способ термообработки			
<b>Austenitizace / Lösungsglühen / Solution Annealing</b>			
Způsob ochlazování / Art der Abkühlung / Method of cooling / Способ охлаждения			
<b>Voda / Wasser / Watter</b>			
Hodnoty tvrdosti / Hodnoty tvrdosti / Hardness test / Величины твердости			
<b>po tepelném zpracování / nach Wärmebehandlung / after heat treatment</b>			
Typ přístroje / Type des Gerätes / Type of instrument / Тип аппарата			
<b>Brinell (HBW 10/3000)</b>			
Základní materiál / Grund material / Base Material / Основной материал			
Přechodové pásmo / Übergangsgebiet / H. A. Z. / Зона терм. влияния			
Svarový kov / Schweissgut / Weld material / Наплавл. металл			
Poznámky / Anmerkungen / Notes / Примечания:			
Zařízení pro tepelné zpracování bylo přezkoušeno dle předpisu: Anlage für Wärmebehandlung wurde überprüft nach: Device for Heat treatment was approved as may by required:			
<b>(AD-Merkblatt HP 7/1 Abz. 3.</b>			
Die gestellten Anforderungen sind erfüllt Manufacturing requirements are satisfied			
Vystavil / dne Auggestellt von / am Prepared by / date Выписал / дня	ZVU Kovárna a.s. útvár výrobce 16.2.2015 Pražská 322 P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové IČ: 03219514	Kontroloval / dne Überprüft von / am Approved by / date Проверил / дня	ZVU Kovárna a.s. ÚŘJ - certifikační technik 1 Pražská 322 P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové IČ: 03219514
	<b>20-02-2015</b>		

# PŘÍLOHA 1 - materiálový list oceli 08CH18N10T

## Diagram tepelného zpracování

Odběratel : Škoda JS a.s.

Orlík 266

316 06 Pízeň

Zakázkové číslo : KS-14/1905 - 3344    Objednávka odběratel: 4902/BO/14

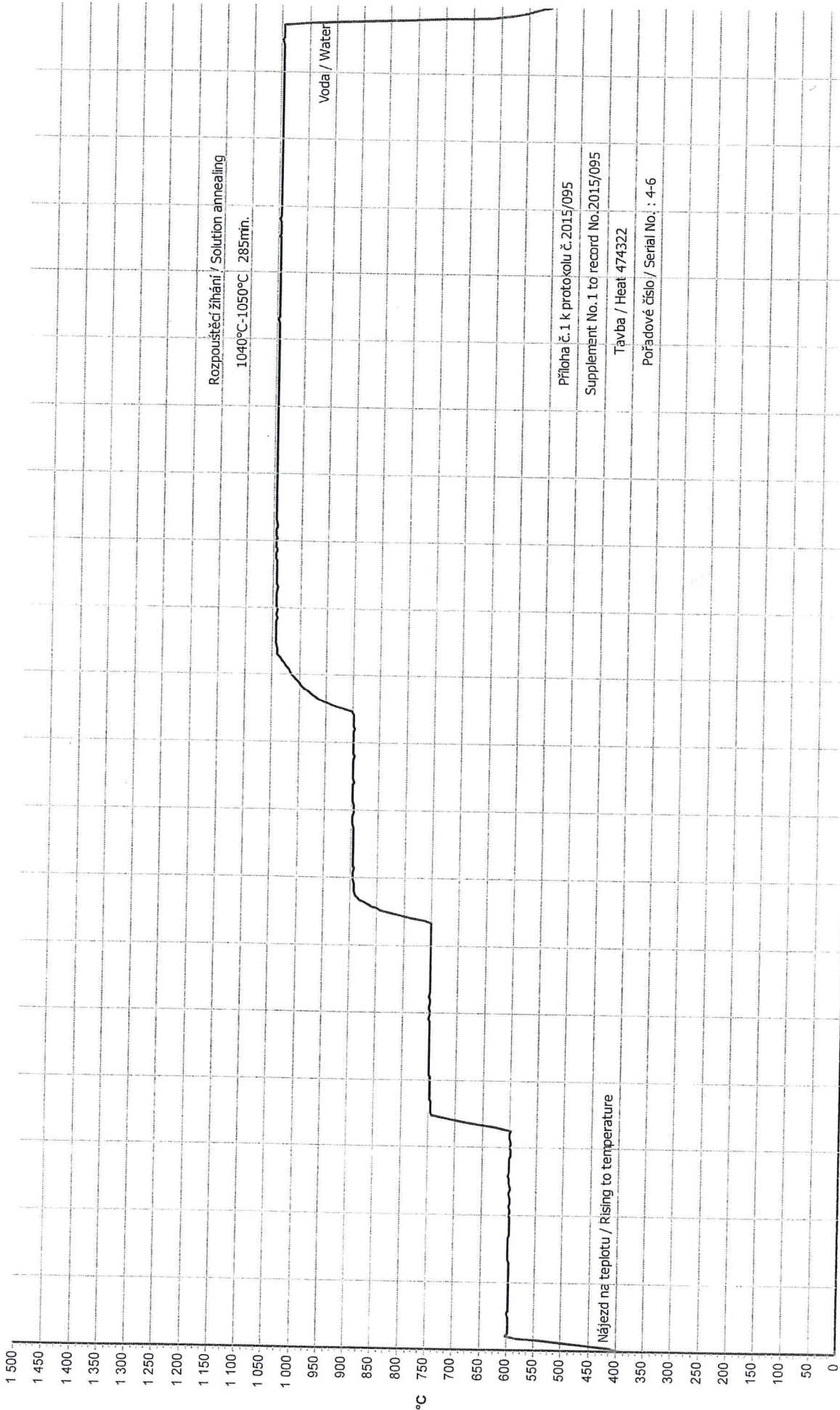
Výrobek : výkovek-tyč KR 180, mat.08CH18N10T

Materiál : 08CH18N10T

ZVU Kovárna a.s.

Prážská třída 322/4

500 04 Hradec Králové



1 dílek = 0.5 hod.

ZVU Kovárna a.s.

Úřk - úseč:3ni technik 1

Prážská 322 P.O.Box 21

501 47 Hradec Králové

IC: 63219514

ZVU Kovárna a.s.

úřk: Výrob 3

Prážská 322 P.O.Box 21

501 47 Hradec Králové

IC: 63219514

Výrobek : Radek Kamenický

Dne : 16.2.2015

11:20:00

10.2.2015

21:20:00

# PŘÍLOHA 1 - TDP oceli T552

<b>W Nr.</b> (číslo materiálu) <b>1.4938</b>	<b>Cr-Ni-Mo-V žárupevná ocel k zušlechťování</b>								<b>OCEL</b> Kurzname (značka) <b>X12CrNiMoV 12-3</b>		
<b>Chemické složení [hm. %]</b>											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N		
0,08– –0,15	max 0,50	0,40– –0,90	max 0,025	max 0,015	11,0– –12,5	2,00– –3,00	1,50– –2,00	0,25– –0,40	0,020– –0,040		
<b>Normy DIN</b>											
DIN EN 10269-99 – oceli a niklové slitiny pro upevňovací prvky pro použití při zvýšených a/nebo nízkých teplotách											
<b>Mechanické vlastnosti</b>											
Rozměr t, d [mm]				–			≤ 160				
Stav				žháný na měkko			zušlechtěný				
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min				–			760				
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]				–			930–1130				
Tažnost A [%] min				–			14				
Kontrakce Z [%] min				–			40				
Nárazová práce KV [J] min				–			40				
Tvrdost HB max				311			–				
Min. hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách (stav: zušlechtěný) – $d \leq 160$ mm											
Teplota [°C]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	730	680	668	655	653	650	630	610	560	505	400
<b>Fyzikální vlastnosti</b>											
Hustota	Měrné teplo		Teplotní součinitel roztlačnosti			Tepelná vodivost		Rezistivita			
$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]			$\lambda_1$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		[ $\Omega$ ·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]			
7 700	460		$10,5 \cdot 10^{-6}$			29		0,86			
<b>Odolnost proti degračním procesům</b>											
ODOLNOST PROTI OXIDACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT – na vzduchu do 600 °C											
<b>Technologické údaje</b>											
<b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ</b>											
žhánání na měkko	660–690 °C	ochlazovat v peci									
kalení	1035–1065 °C	ochlazovat v oleji									
popouštění	600–670 °C										
<b>TVAŘITELNOST</b>											
teploty tváření	1150–850 °C										
<b>SVAŘITELNOST</b>											
předehřev 350 °C, po svařování pomalu ochlazovat na 120 °C, opětně zušlechtit											



# PŘÍLOHA 1 - TDP oceli T552

<b>Použití</b>					
Letecký materiál pro teploty 500–600 °C.					
<b>Ostatní vlastnosti</b>					
Způsob výroby: volí výrobce					
<b>Porovnání se zahraničními materiály</b>					
<i>ISO</i>		<i>Německo</i>		<i>Česká republika</i>	
–	–	X12CrNiMoV12-3	EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	ČSN EN 10269-01
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
X12CrNiMoV12-3	NF EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	BS EN 10269-99	–	–
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
X12CrNiMoV12-3	UNI EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	ÖNORM EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	SS EN 10269-99
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
–	–	–	–	X12CrNiMoV12-3	NS EN 10269-99
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
X12CrNiMoV12-3	SFS EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	EN 10269-99	X12CrNiMoV12-3	UNE EN 10269-99
<i>Austrálie</i>		<i>Belgie</i>		<i>Bulharsko</i>	
–	–	X12CrNiMoV12-3	NBN EN 10269-99	–	–
<i>Brazílie</i>		<i>Čína</i>		<i>Jugoslávie</i>	
–	–	–	–	–	–