

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení disertační práci zpracovanou na téma:

Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, dle Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji profesorovi Josefu Kottovi, profesorovi Antonínu Křížovi, inženýru Josefu Strejciusovi a inženýru Janu Kaufmanovi za pomoc a spolupráci na provedených testech. Dále pak děkuji celé své rodině a kamarádům za podporu během studia.

ANOTACE

| | | |
|-----------------------------|---|------------------|
| AUTOR | Příjmení (včetně titulů) Ing. Špirit | Jméno Zbyněk |
| STUDIJNÍ OBOR | Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE | Jméno Antonín |
| PRACOVISŤE VEDOUcíHO | Katedra materiálů a strojírenské metalurgie | |
| DRUH PRÁCE | disertační | |
| NÁZEV PRÁCE | Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening | |

Fakulta: Strojní

Katedra: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Rok odevzdání: 2021

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|-----|---------------------|----|----------------------|----|
| Celkem | 152 | Textová část | 64 | Grafická část | 88 |
|---------------|-----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|---|---|
| STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Zvýšení užitečných vlastností namáhaných komponent v energetickém sektoru pomocí technologie Laser Shock Peening. |
| KLÍČOVÁ SLOVA | Laser Shock Peening, zbytkové napětí, korozní praskání, vysoko cyklická únava a energetika |

SUMMARY

| | | |
|--------------------------|---|-----------------|
| AUTHOR | Surname (including of Degrees) Ing. Špirit | Name Zbyněk |
| FIELD OF STUDY | Materials Engineering and Engineering Metallurgy | |
| SUPERVISOR | Surname (including of Degrees) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE | Name Antonín |
| INSTITUTION | DEPARTMENT OF MATERIALS AND ENGINEERING METALLURGY | |
| TYPE OF WORK | dissertation | |
| TITLE OF THE WORK | Innovative method for surface treatment stainless steels by Laser Shock Peening | |

Faculty: Mechanical Engineering

Department: Materials Engineering and Engineering Metallurgy

Submitted in: 2021

Number of pages (A4 a eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|-----|------------------|----|-----------------------|----|
| Totally | 152 | Text part | 64 | Graphical part | 88 |
|----------------|-----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | Increase the utility properties of loaded components in the energy sector using Laser Shock Peening technology. |
| KEY WORDS | Laser Shock Peening, Residual Stress, Hight Cycle fatigue, Stress Corrosion Cracking, Power Plants |

1 Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam obrázků | 7 |
| Seznam zkratk | 11 |
| Úvod | 13 |
| 2 Cíle disertační práce | 14 |
| 3 Současný stav problematiky | 15 |
| 4 Rešeršní část disertační práce | 17 |
| 4.1 Tradiční metody zpevňování povrchu otryskáváním a kuličkováním (SP) | 17 |
| 4.2 Ultrazvukové zpevňování povrchu | 20 |
| 4.3 Zpevňování povrchu vodní paprskem Water Jet Peening (WJP) | 22 |
| 4.4 Popis technologie Laser Shock Peening (LSP) | 24 |
| 4.5 Srovnání metod zpevňování povrchu | 32 |
| 4.6 Zbytková napětí | 33 |
| 4.7 Měření zbytkového napětí | 33 |
| 4.8 Únavové poškození | 36 |
| 4.9 Hodnocení únavové životnosti lopatkových ocelí s uměle vyrobenými důlky ... | 42 |
| 4.10 Korozní praskání | 44 |
| 4.11 Aplikace LSP na materiály v energetickém sektoru ČR | 46 |
| 5 Geneze výzkumné práce | 47 |
| 6 Popis a zdůvodnění experimentálního programu | 48 |
| 6.1 Experimentální materiál | 48 |
| 6.2 Použitá technologie LSP pro modifikaci povrchu | 50 |
| 6.3 Experimentální metodiky | 55 |
| 6.4 Měření zbytkového napětí na povrchu a pod povrchem materiálu | 55 |
| 6.5 Ověření vlivu LSP na průběh mikrotvrdosti | 55 |
| 6.6 Tahová zkouška zpevněných vzorků | 55 |
| 6.7 Únavové zkoušky v tříbodovém ohybu | 56 |
| 6.8 Ověření vlivu strategie „střelby“ na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost | 57 |
| 6.9 Zkouška korozního praskání v prostředí roztoku chloridu hořečnatého | 58 |
| 6.10 Zkouška VCÚ s uměle vyrobeným korozním bodem | 58 |
| 6.11 Fraktografická expertiza lomových ploch zkušebních těles s vruby po VCÚ | 60 |
| 7 Výsledky | 61 |
| 7.1 Měření zbytkového napětí na povrchu a pod povrchem materiálu | 61 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.2 | Ověření vlivu LSP na průběh mikrotvrdosti..... | 64 |
| 7.3 | Tahová zkouška zpevněných vzorků | 66 |
| 7.4 | Únavové zkoušky v tříbodovém ohybu | 67 |
| 7.5 | Ověření vlivu strategie „střelby“ na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost..... | 70 |
| 7.6 | Zkouška korozního praskání v prostředí roztoku chloridu hořečnatého | 71 |
| 7.7 | Zkouška VCÚ s uměle vyrobeným korozním bodem..... | 73 |
| 7.8 | Fraktografická expertíza lomových ploch zkušebních těles s vruby po VCÚ | 75 |
| 8 | Diskuse výsledků..... | 86 |
| 8.1 | Plán dalšího výzkumu v oblasti LSP | 89 |
| 9 | Závěr | 90 |
| 10 | Citovaná literatura. | 92 |
| 11 | Publikační činnost doktoranda | 96 |
| 11.1 | Publikované články na téma DiP | 96 |
| 11.2 | Publikované články | 96 |
| 11.3 | Vystoupení na konferencích a seminářích v rámci DiP | 97 |
| 11.4 | Vystoupení na konferencích a seminářích | 97 |
| 12 | PŘÍLOHY..... | 98 |
| 12.1 | Nejvýznamnější publikované články v oblasti LSP..... | 98 |
| 12.2 | Zkušební protokol k materiálu GOST 08CH18N10T | 99 |
| 12.3 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa Z19 | 106 |
| 12.4 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa Z32 | 112 |
| 12.5 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 3 | 117 |
| 12.6 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 6 | 121 |
| 12.7 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 23 | 126 |
| 12.8 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 25 | 130 |
| 12.9 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 42 | 135 |
| 12.10 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa 42 | 139 |
| 12.11 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa B1 | 144 |
| 12.12 | Fraktografická analýza zkušebního tělesa B7 | 148 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 4.1-1 Mechanismus metody SP [4] | 17 |
| Obr. 4.1-2 Průběh zbytkového napětí po SP [4]..... | 18 |
| Obr. 4.1-3 Zařízení pro měření průhybu „Almen gauge“ – rozměry v [mm][5]..... | 18 |
| Obr. 4.1-4 Tryskací stroje poháněné vzduchem (vlevo), metacími koly (vpravo) [5] | 19 |
| Obr. 4.1-5 Otryskávací robotické rameno [6] | 20 |
| Obr. 4.2-1 UP hlavice, generátor ultrazvukových vln (1), převodník (2), indentor (3), vedení indentorou (4), schéma pohybu indentoru (5) [7] | 21 |
| Obr. 4.2-2 Ruční UP modifikace svarových spojů [8] | 21 |
| Obr. 4.2-3 Wöhlerův diagram po VCÚ svařeného materiálu, křivka 1 – bez UP úpravy, křivka 2–s UP úpravou, křivka 3–s UP úpravou po 50 % cyklů životnosti [8]..... | 22 |
| Obr. 4.2-4 Svarový spoj před [vlevo] a po [vpravo] UP modifikaci [7] | 22 |
| Obr. 4.3-1 Schéma trysky WJP dle AREVA [9] | 23 |
| Obr. 4.3-2 Princip a vznik tlakových vln pro zpevnění metodou WJP [9] | 23 |
| Obr. 4.3-3 Průběh zbytkového napětí oceli 316L SS bez a se zpevněním metodou WJP [9] | 24 |
| Obr. 4.4-1 Zpracování lopatek turbokompresoru technologií LSP [29] | 25 |
| Obr. 4.4-2 Schematické uspořádání LSP procesu [2] | 25 |
| Obr. 4.4-3 Schéma LSP procesu. Dopadající laserový puls odpaří absorpční vrstvu a mezi vzorkem a vodní vrstvou vznikne expandující plazma, které v materiálu vyvolá rázovou vlnu [11] | 26 |
| Obr. 4.4-4 Ablací proces při interakci laseru s povrchem materiálu [15]..... | 27 |
| Obr. 4.4-5 Vliv délky pulsu na velikost tlaku plazmatu při LSP [18] | 28 |
| Obr. 4.4-6 Vliv délky pulsu a hustoty pulsu na velikost tlaku plazmatu při LSP [15] | 28 |
| Obr. 4.4-7 Robotické rameno se zpracovávaným vzorkem | 29 |
| Obr. 4.4-8 Smáčení povrchu vzorku vodou při LSP procesu | 29 |
| Obr. 4.4-9 Zkušební série „výstřelů“ pro hodnocení odolnosti pásky | 31 |
| Obr. 4.4-10 Zkušební série výstřelů pro optimalizaci překryvu | 32 |
| Obr. 4.7-1 Rozdělení metod měření zbytkových napětí [10]..... | 34 |
| Obr. 4.7-2 Difrakce z rovin (které splňují Braggův zákon) [24] | 35 |
| Obr. 4.7-3 Princip měření deformace odvrtávací metodou [25] | 36 |
| Obr. 4.8-1 Wöhlerova křivka s popisem [30] | 37 |
| Obr. 4.8-2 Časový průběh základních typů cyklického namáhání materiálů: a – střídavý | 37 |
| Obr. 4.8-3 Schematické znázornění mechanismů porušení v případech současného působení [49] | 38 |
| Obr. 4.8-4 Vliv rozpuštěného kyslíku v roztoku 3 hm. % NaCl při 25 °C, na únavové chování oceli (0,18 hm. %) [49] | 38 |
| Obr. 4.9-1 Základní typy korozních důlků [54] | 42 |
| Obr. 4.9-2 Výroba korozního bodu elektrochemickou metodou [55] | 43 |
| Obr. 4.9-3 Korozní cela pro měření vysokocyklické únavy na tělesech s uměle vyrobeným korozním bodem | 44 |
| Obr. 4.10-1 Mechanismus korozního praskání [32]..... | 44 |
| Obr. 4.10-2 Mechanismus korozního praskání [45]..... | 45 |
| Obr. 4.10-3 Korozní praskání oceli AISI 304 [22]..... | 46 |
| Obr. 6.2-1 LSP laboratoř FZÚ HiLase [36]..... | 50 |

| | |
|---|-----|
| Obr. 6.2-2 LSP laboratoř „Center for Laser Shock Processing for Advanced Materials and Devices“ | 50 |
| Obr. 6.2-3 Schéma testované destičky s LSP modifikací [24]..... | 51 |
| Obr. 6.2-4 Zpevněné desky pro výrobu zkušebních těles | 53 |
| Obr. 6.2-5 Strategie umístění jednotlivých "výstřelů" | 53 |
| Obr. 6.2-6 Zpevněná trubka technologií LSP s ablační páskou | 54 |
| Obr. 6.2-7 Strategie a umístění jednotlivých "výstřelů" | 54 |
| Obr. 6.4-1 Výkres zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku | 55 |
| Obr. 6.4-2 Zkušební těleso po LSP..... | 56 |
| Obr. 6.4-3 Výkres zkušebního tělesa pro VCÚ v ohybu | 56 |
| Obr. 6.4-4 Výkres vzorku pro tříbodový ohyb..... | 57 |
| Obr. 6.4-5 Ovlivněná plocha LSP technologií (vlevo) a měřené oblasti zbytkového napětí (vpravo) | 57 |
| Obr. 6.4-6 Výkres vzorku (vlevo) a zpevněný a nezpevněný vzorek (vpravo) | 58 |
| Obr. 6.4-7 Zkušební těleso pro VCÚ s uměle vyrobeným vrubem..... | 59 |
| Obr. 6.4-8 Reálný tvar uměle vyrobeného vrubu na lomové ploše zkušebního tělesa | 60 |
| Obr. 7.1-1 Naměřené hodnoty zbytkového napětí před a po LSP pro GOST 08CH18N10T..... | 62 |
| Obr. 7.1-2 Naměřené hodnoty zbytkového napětí před a po LSP pro Böhler T552 | 62 |
| Obr. 7.1-3 Hloubkový profil GOST 08CH18N10T (oblast 3) – nezpevněný stav | 63 |
| Obr. 7.1-4 Hloubkový profil GOST 08CH18N10T (oblast 3) – zpevněný povrch po LSP ... | 63 |
| Obr. 7.1-5 Hloubkový profil Böhler T552 (oblast 2)- nezpevněný stav..... | 64 |
| Obr. 7.1-6 Hloubkový profil Böhler T552 (oblast 2) – zpevněný povrch po LSP | 64 |
| Obr. 7.2-1 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP GOST 08CH18N10T pro orientaci 0° | 65 |
| Obr. 7.2-2 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP GOST 08CH18N10T pro orientaci 90° | 65 |
| Obr. 7.2-3 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP Böhler T552 pro orientaci 0°. | 66 |
| Obr. 7.2-4 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP Böhler T552 pro orientaci 90° | 66 |
| Obr. 7.3-1 Tahový diagram pro GOST 08CH18N10T | 67 |
| Obr. 7.3-2 Tahový diagram pro Böhler T552..... | 67 |
| Obr. 7.4-1 Výsledky ze zkoušek VCÚ materiálu Böhler T552 | 68 |
| Obr. 7.4-2 Výsledky ze zkoušek VCÚ materiálu GOST 08CH18N10T | 69 |
| Obr. 7.5-1 Naměřené hodnoty zbytkového napětí..... | 70 |
| Obr. 7.5-2 Wöhlerova křivka nezpevněných a zpevněných zkušebních těles | 70 |
| Obr. 7.6-1 Snímek povrchu vzorku po korozní zkoušce – nezpevněný stav | 71 |
| Obr. 7.6-2 Detaily povrchu vzorku po korozní zkoušce – nezpevněný stav..... | 71 |
| Obr. 7.6-3 Snímek povrchu vzorku po korozní zkoušce – zpevněný stav | 72 |
| Obr. 7.6-4 Detaily povrchu vzorku po korozní zkoušce – zpevněný stav..... | 72 |
| Obr. 7.6-5 Příčný výbrus vzorků (nezpevněný stav) – leštěný (vlevo) a leptaný (vpravo) | 73 |
| Obr. 7.7-1 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) - varianta LSP 3..... | 73 |
| Obr. 7.7-2 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) – varianta LSP 2..... | 74 |
| Obr. 7.7-3 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) – varianta LSP 1..... | 74 |
| Obr. 7.7-4 Wöhlerovy křivky jednotlivých sérií na vzduchu..... | 75 |
| Obr. 7.7-5 Wöhlerovy křivky sérií č. 4 (vzduch) a č. 5 (parní kondenzát) | 75 |
| Obr. 12.3-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 106 |

| | |
|---|-----|
| Obr. 12.3-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 106 |
| Obr. 12.3-3 Plocha únavové trhliny | 107 |
| Obr. 12.3-4 Oblast LP u ohniska | 107 |
| Obr. 12.3-5 Ohnisko | 108 |
| Obr. 12.3-6 0,38 mm od ohniska..... | 108 |
| Obr. 12.3-7 0,38 mm od ohniska, 10000x..... | 109 |
| Obr. 12.3-8 0,75 mm od ohniska..... | 109 |
| Obr. 12.3-9 0,89 mm od ohniska, 2000x..... | 110 |
| Obr. 12.3-10 1,32 mm od ohniska, 2000x..... | 110 |
| Obr. 12.3-11 Tvárné dolomení, 2000x | 111 |
| Obr. 12.3-12 Přehled dokumentovaných oblastí LP od ohniska..... | 111 |
| Obr. 12.4-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 112 |
| Obr. 12.4-2 Přehledový snímek LP celého ZT v příčném směru | 112 |
| Obr. 12.4-3 Oblast únavové trhliny..... | 113 |
| Obr. 12.4-4 Oblast u ohniska 2000x..... | 113 |
| Obr. 12.4-5 0,31 mm od ohniska, 10000x..... | 114 |
| Obr. 12.4-6 0,78 mm od ohniska, 5000x..... | 114 |
| Obr. 12.4-7 1,19 mm od ohniska, 2000x..... | 115 |
| Obr. 12.4-8 1,64 mm od ohniska, hranice mezi trhlinou a dolomem, 2000x..... | 115 |
| Obr. 12.4-9 Dolom,750x..... | 116 |
| Obr. 12.4-10 Přehled dokumentovaných oblastí LP od ohniska..... | 116 |
| Obr. 12.5-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 117 |
| Obr. 12.5-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 117 |
| Obr. 12.5-3 Lomová plocha s vrubem | 118 |
| Obr. 12.5-4 Lomová plocha celého ZT..... | 118 |
| Obr. 12.5-5 detail vrubu | 119 |
| Obr. 12.5-6 detail hrany vrubu..... | 119 |
| Obr. 12.5-7 detai bokul vrubu | 120 |
| Obr. 12.5-8 detail kořene vrubu..... | 120 |
| Obr. 12.5-9 Striační linie 0,8 mm od ohniska | 121 |
| Obr. 12.6-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 121 |
| Obr. 12.6-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 122 |
| Obr. 12.6-3 Lomová plocha s vrubem | 122 |
| Obr. 12.6-4 Lomová plocha celého ZT..... | 123 |
| Obr. 12.6-5 detail vrubu | 123 |
| Obr. 12.6-6 hrana vrubu..... | 124 |
| Obr. 12.6-7 bok vrubu | 124 |
| Obr. 12.6-8 kořen vrubu..... | 125 |
| Obr. 12.6-9 striační linie 0,5mm od ohniska | 125 |
| Obr. 12.7-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 126 |
| Obr. 12.7-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 126 |
| Obr. 12.7-3 Lomová plocha s vrubem | 127 |
| Obr. 12.7-4 Lomová plocha ZT | 127 |
| Obr. 12.7-5 Vrub..... | 128 |
| Obr. 12.7-6 hrana vrubu..... | 128 |
| Obr. 12.7-7bok vrubu | 129 |
| Obr. 12.7-8 kořen vrubu..... | 129 |

| | |
|--|-----|
| Obr. 12.7-9 Striační linie 0,8 mm od ohniska | 130 |
| Obr. 12.8-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 130 |
| Obr. 12.8-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 131 |
| Obr. 12.8-3 Lomová plocha s vrubem | 131 |
| Obr. 12.8-4 Lomová plocha ZT | 132 |
| Obr. 12.8-5 Vrub..... | 132 |
| Obr. 12.8-6 Hrana vrubu | 133 |
| Obr. 12.8-7 Bok vrubu | 133 |
| Obr. 12.8-8 Kořen vrubu | 134 |
| Obr. 12.8-9 Striační linie 0,84 mm od ohniska..... | 134 |
| Obr. 12.9-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 135 |
| Obr. 12.9-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 135 |
| Obr. 12.9-3 Vrub..... | 136 |
| Obr. 12.9-4 Lomová plocha ZT | 136 |
| Obr. 12.9-5 Vrub..... | 137 |
| Obr. 12.9-6 Hrana vrubu | 137 |
| Obr. 12.9-7 Bok vrubu | 138 |
| Obr. 12.9-8 Kořen vrubu | 138 |
| Obr. 12.9-9 Striační linie 0,7 mm od ohniska | 139 |
| Obr. 12.10-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 139 |
| Obr. 12.10-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 140 |
| Obr. 12.10-3 Lomová plocha s vrubem | 140 |
| Obr. 12.10-4 Lomová plocha ZT | 141 |
| Obr. 12.10-5 Vrub..... | 141 |
| Obr. 12.10-6 Hrana vrubu | 142 |
| Obr. 12.10-7 Bok vrubu | 142 |
| Obr. 12.10-8 Kořen vrubu | 143 |
| Obr. 12.10-9 Striační linie 0,95 od ohniska | 143 |
| Obr. 12.11-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 144 |
| Obr. 12.11-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 144 |
| Obr. 12.11-3 Lomová plocha s vrubem | 145 |
| Obr. 12.11-4 Lomová plocha ZT | 145 |
| Obr. 12.11-5 Vrub..... | 146 |
| Obr. 12.11-6 Hrana vrubu | 146 |
| Obr. 12.11-7 Bok vrubu | 147 |
| Obr. 12.11-8 Kořen vrubu | 147 |
| Obr. 12.11-9 Striační linie 2,2 mm od ohniska | 148 |
| Obr. 12.12-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska | 148 |
| Obr. 12.12-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru | 149 |
| Obr. 12.12-3 Lomová plocha s vrubem | 149 |
| Obr. 12.12-4 Lomová plocha ZT | 150 |
| Obr. 12.12-5 Vrub..... | 150 |
| Obr. 12.12-6 Hrana vrubu | 151 |
| Obr. 12.12-7 Bok vrubu | 151 |
| Obr. 12.12-8 Kořen vrubu | 152 |
| Obr. 12.12-9 Striační linie 1,9 mm od ohniska | 152 |

Seznam zkratk

LSP – Laser shock peening
SP – Shot peening
JE – Jaderná elektrárna
PVD - Physical Vapor Deposition
CVD - Chemical Vapor Deposition
LP – Lomová plocha
SCC - Stress Corrosion Cracking
DiP – Disertační práce
EBSD - Electron backscatter diffraction
HRC – Tvrdost dle Rockwela
UP - Ultrasonic Peening
UIT - Ultrasonic impact treatment
UIP - Ultrasonic impact peening
VCÚ – Vysoko cyklická únava
WJP - Water Jet Peening
FOD - Foreign Object Damadge
HEL - Hugoniotův elastický limit
RS – Residual stress
XRD - X-ray diffraction
VVER - vodo-vodní energetický reaktor
MKP - Metoda konečných prvků
 N_c – počet cyklů do lomu u zkoušce VCÚ
ZT – zkušební těleso
EPRI - Electric Power Research Institute

ANOTACE

Tématem disertační práce je „Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening (LSP)“. Disertační práce je zaměřena na popsání vlivu LSP na užité vlastnosti testovaných ocelí používaných v energetickém sektoru ČR. Konkrétně pak popsání a prokázání příznivého vlivu LSP na zvýšení únavové životnosti materiálu Böhler T552 s uměle vyrobenými vadami simulujícími bodové korozní napadení, které je jedním z nejčastěji se vyskytujících problémů u koncových lopatek parních turbín a příčinou závažných havárií. Dále pak se práce zaměřuje na zvýšení únavové životnosti a korozní odolnosti oceli GOST 08CH18N10T. Pro uskutečnění výzkumného záměru byla zpracována rešeršní a experimentální část. Hlavní výstupem této práce je vyvinutí metody zpevňování pro potlačení vzniku a šíření trhliny.

ANNOTATION

The topic of the dissertation is "Innovative method of surface treatment of stainless steels by Laser Shock Peening (LSP)". The dissertation is aimed at describing the influence of LSP on the useful properties of tested steels used in the energy sector of the Czech Republic. Specifically, the description and demonstration of the beneficial effect of LSP on increasing the fatigue life time of Böhler T552 steel with artificial-made defects simulating point corrosion attack, which is one of the most common issues with steam turbine end blades and the cause of serious accidents. Furthermore, the work focuses on increasing the fatigue life time and corrosion resistance of steel GOST 08CH18N10T. The research and experimental part was prepared for the realization of the research plan. The main output of this work is the development of a strengthening method to suppress the formation and propagation of cracks.

Úvod

S požadavky průmyslu, armády a zdravotnictví na zvyšování užitečných vlastností součástí roste i požadavek na materiály a jejich úpravy. U vysoce namáhaných součástí, které se vyskytují v širokém spektru oborů, je jedním ze základních požadavků na materiál pevnost a životnost. Pevnost materiálu souvisí s vnitřním uspořádáním, chemickým složením po vnitřní strukturu a technologii výroby. Odolnost materiálu proti cyklickému zatěžování – únavě je úzce spjata s integritou povrchu. Integritu povrchu lze popsat jako volný soubor vlastností povrchové plochy a povrchové vrstvy, které jsou vytvořeny nebo ovlivněny technologickými procesy a u kterých se předpokládá vliv na funkční vlastnosti součásti. Mezi parametry, kterými lze číselně popsat stav integrity povrchu jsou zbytková napětí, povrchová drsnost a geometrická přesnost strojní součásti. Pojem integrita povrchu je však mnohem komplexnější a zahrnuje i další parametry, které nelze tak snadno číselně vyjádřit.

Je nezbytné brát stav povrchu v potaz a případně ho modifikovat a optimalizovat pro danou aplikaci. Důležitý parametr, který je třeba sledovat z pohledu vzniku a šíření trhliny, je orientace a velikost vnitřního napětí na povrchu a pod povrchem součásti.

Zjednodušeně lze říct, že přítomnost tlakového napětí v materiálu má příznivý vliv proti vzniku a šíření trhliny. Proto je snaha vnést tlakové napětí do nejvíce exponovaných míst v materiálu. Nejrozšířenější konvenční metody pro zvýšení příznivého tlakového napětí jsou známy již několik desítek let. Jedny z prvních se začaly vyvíjet v období 2. světové války v oblasti zbrojního průmyslu a automobilismu [1]. Nejrozšířenější kontaktní metodou je „Shot peening“ (SP) „kuličkování, brokování a tryskání“. Metoda spočívá v otryskávání povrchu cizími tělísky, které přenášejí svojí kinetickou energii do povrchu součásti ve formě vneseného zbytkového napětí. Tato technologie má však své limity, jakými jsou velikost vneseného napětí, malá hloubka vneseného napětí, přesnost tryskání tělísek do určitého místa na povrchu materiálu atd.

Proto s vývojem moderních technologií, mezi které patří vysokofrekvenční pulsní lasery, se vyvinula nová technologie „Laser shock peening (LSP)“, která má stejný cíl jako konvenční technologie SP. Důvodem vzniku této nové technologie a výhodou oproti konvenční „Shot Peening (SP)“ metodám, je zejména vyšší výkonnost ve smyslu vyššího vnesení zbytkového napětí hlouběji pod povrch [2]. Princip metody byl objeven již v roce 1963 v USA. Vznik a rozvoj metody začal v devadesátých letech 20. století v USA, Francii a Číně. Důvodem bylo zlepšení dostupnosti pulsních laserů, které do té doby byly velice drahé a poruchové [1, 2].

2 Cíle disertační práce

Disertační práce je zaměřena na možnosti využití povrchové úpravy Laser shock peening (LSP) ke zvýšení mechanických a fyzikálních vlastností kovových materiálů, které se používají v českém a evropském energetickém sektoru. Technologie LSP patří mezi nové nekonvenční metody zpevňování povrchu využívající rázové vlny vzniklé interakcí laseru s ovlivňovaným povrchem. Vzniklá rázová vlna způsobuje v kovových materiálech vznik či nárůst zbytkového napětí, které v případě tlakového typu má příznivý vliv na mechanické vlastnosti.

Cílem disertační práce je popsání vlivu nové technologie LSP na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů, které se touto technologií prozatím nezpracovávají. Dále se v disertační práci hodnotí dopad technologie LSP na změnu materiálu z pohledu integrity povrchu. Z jednotlivých analýz materiálu po zpracování technologií LSP vyplyne, zdali LSP měla příznivý vliv na zvýšení užitečných vlastností testovaných materiálů. Dalším cílem je optimalizace a nastavení procesu LSP pro jednotlivé materiály a zkušební tělesa. Výzkumným záměrem této práce bude ověřit hypotézu o potlačení vzniku a šíření trhlin při únavovém namáhání a pomocí fraktografických analýz popsat změnu v chování šíření únavových trhlin.

Rozdělení hlavních cílů disertační práce:

- Ověření vlivu LSP na materiálové vlastnosti ocelí Böhler T552 a GOST 08CH18N10T, které se používají v českém energetickém sektoru
- Optimalizace metody LSP pro zvýšení mechanických vlastností na ocelích Böhler T552 a GOST 08CH18N10T, které se používají v oblasti klasické a jaderné energetiky
- Posouzení možnosti aplikace LSP na opravu lopatek parních turbín

3 Současný stav problematiky

V současné době existuje mnoho technologií, které mají za cíl zpevnění povrchu a zvýšení mechanických vlastností, případně fyzikálních a chemických vlastností. Každá technologie však využívá jiné principy a přístupy.

Tato práce se věnuje metodám založených na principech zvýšení tlakových napětí v materiálu, které využívají kinetickou rychlost tělísek nebo energií tlakových vln, které po dopadu na povrch materiálu vytváří tlakové vnitřní napětí v materiálu, nejvíce pak metodě LSP. Metody LSP či Laser Peening (LP) jsou totožné a v poslední dekádě let zaznamenaly velký průlom zejména v oblasti letectví, energetice, armádních aplikací či ve zdravotnictví. Jedním z výhod této metody je přesně definované vložení energie do povrchu materiálu a dobrá automatizace LSP procesu. Další výhodou je typ a tvar generované rázové vlny, která vytváří požadované tlakové napětí hlouběji než u konvenční metody SP. První zmínky o technologii LSP jsou z konce 60. let, kdy v Battele Columbus Laboratories v USA byl poprvé popsán princip generování tlakových vln prostřednictvím pulsních laserů [2, 18]. Mezi první publikované články popisující interakci rázové vlny vyvolané pomocí pulsního laseru s kovovým materiálem patří „Interaction of laser-induced stress waves with metals“ a „Laser generation of high-amplitude stress waves in materials“ od Fairand, A. H., Clauer, B. P. z roku 1979 a „Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum“ od Fairand, A. H., Wilcox, B. A., Gallagher, W. J., Williams, D. N. z roku 1972 [19, 20, 21]. Implementace LSP do výroby byla zpočátku značně pomalá, jelikož vysoká cena a dostupnost pulsních laserů byla značně omezená. Z tohoto důvodu byla jedna z prvních aplikací LSP v armádním sektoru, konkrétně na kompresové části leteckého motoru. S podstatným zlevněním výroby pulsních laserů v posledních pěti letech dochází k rychlé transformaci LSP technologie do běžného průmyslu, kde se dříve používaly pouze konvenční způsoby (kuličkování, brokování, balotínování atd.).

V současné době dochází k širokému použití technologií LSP v armádním sektoru, letectví, energetice, zdravotnictví a v loďařství. Ve všech odvětvích průmyslu pomáhá LSP technologie zvyšovat životnost komponent, a to jak již vyrobených formou servisu, tak při samotné výrobě komponent. Hlavní doménou LSP je zvyšování únavové životnosti komponent, potlačení nepříznivých účinků konstrukčních či výrobních vrubů ve strojních součástech, potlačení korozního praskání – Stress Corrosion Cracking (SCC), zlepšení odolnosti proti eroznímu a kavitačnímu poškození materiálu, zabránění rozvoje a šíření trhliny z povrchu materiálu.

Tato práce se zaměřuje na využití LSP technologie v energetické průmyslu, kde se používají ušlechtilé oceli s vysokými požadavky na mechanické a korozní vlastnosti (únavová životnost, korozní odolnost, erozní odolnost, atd). V energetickém průmyslu se již LSP technologie začala používat, a to zejména v jaderné energetice. Průkopníkem byla průmyslová společnost TOSHIBA (Japonsko), která v roce 2002 poprvé použila technologii LSP na komponentách jaderných reaktorů za účelem eliminace vzniku SCC. Mezi hlavní představitele této aplikace patří profesor Yuano Sano, který se LSP věnuje dodnes [22]. LSP technologie nachází uplatnění zejména tam, kde jsou vysoce namáhané strojní součásti, u kterých nelze snadno měnit konstrukci či materiál. Nabízejí aplikace jsou např. pro potlačení SCC na heterogenních svarech, zvýšení únavové životnosti lopatek a rotorů parních turbín, prodloužení životnosti cirkulačních čerpadel a dalších dynamicky a korozně namáhaných komponent.

Výzkum a vývoj technologie LSP se kromě Japonska (Toshiba) a USA (University of Cincinnati), Francie a Číny začíná více objevovat ve Španělsku, Německu, Británii a od roku 2016 i v České republice. V České republice se nachází jedno pracoviště, které disponuje technologií LSP, a tím je Výzkumné centrum HiLASE (pro High average power pulsed LASERs). Nachází se v Dolních Břežanech u Prahy a jeho činnost úzce souvisí s vedlejším výzkumným centrem ELI Beamlines [10].

Mimo tradiční metody zpevňování povrchu existují i jiné bezkontaktní technologie, které přináší obdobný efekt jako LSP. Jedná se o technologie Water Jet Peening a Ultrasonic peening. Tyto technologie jsou založeny na jiných principech než LSP a nevnašejí tlakové napětí do takových hloubek [9].

4 Rešeršní část disertační práce

4.1 Tradiční metody zpevňování povrchu otryskáváním a kuličkováním (SP)

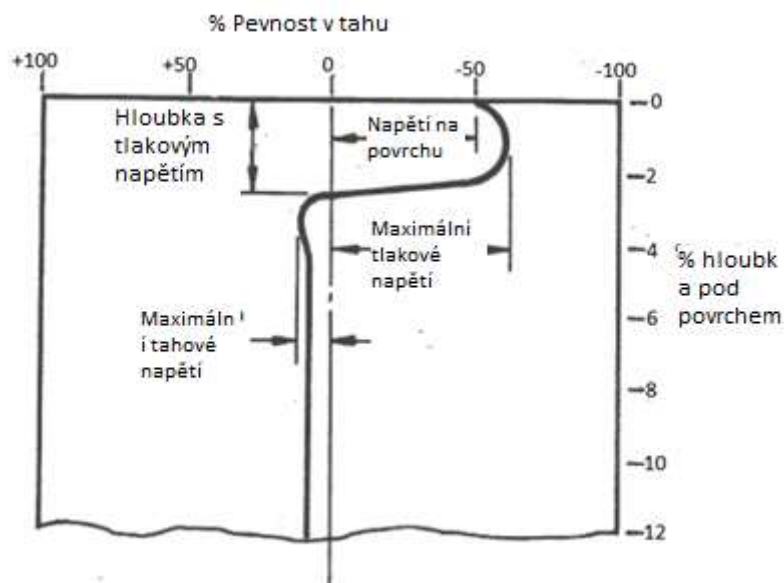
První zmínky o zpevňování povrchu pomocí tryskání cizích tělísek na povrch materiálu se datují k roku 1940, kdy byl společností Zimmerly of Associated Spring na konferenci ASM publikován článek s názvem „How Shot Blasting Increases Fatigue Life“, který popisoval, jakým způsobem lze prodloužit únavovou životnost materiálu [1]. V roce 1942 společnost General Motors patentovala zařízení a přípravek pro otryskávání povrchu v definované oblasti [1]. Oddělení americké armády zavádí v roce 1944 specifikaci s názvem AXS-1272 „Shot Peening of Metals, General Specification For“, která má za cíl předepsání parametrů pro různé aplikace SP [1]. V roce 1945 byla společností General Motors představena metodika pro stanovení a měření intenzity SP, tzv. Almen test [1]. Společnost automobilových inženýrů SAE v roce 1948 představila dokument AMS 2430 „Application: To impose compressive stresses on specified surface layers of metallic parts, primarily for increasing fatigue strength but may be used for other purposes such as testing for bond of plated materials.“ [1], kde definuje šířku ovlivněného pásu, rychlost a dobu tryskání. V roce 1972 bylo společností 3M Corporation představeno mobilní zařízení pro SP na opravu vrtulníků [1]. Americké námořnictvo zavádí dokument „Peening of Metal Parts“, který obsahuje souhrn všech parametrů pro SP [1].

Rozdíl mezi otryskáváním a kuličkováním spočívá ve tvaru dopadajících tělísek, kdy při tryskání mohou být použity různé tvary tělísek, při kuličkování pouze kuličky. SP je technologický proces tváření za studena, při kterém je část nebo celý povrch ovlivňovaného materiálu vystaven plastické deformaci, která vznikne při dopadu kulových tělísek o vysoké energii. Každé tělísko vytvoří kráter odpovídající průměru tělíska do hloubky několika mikronů až milimetrů v závislosti na ovlivňovaném materiálu a parametrech procesu. Krátery na povrchu tvoří vrstvu, která vykazuje vysokou plastickou deformaci, která má za následek vznik tlakových napětí v místě dopadu kuličky a přesun tahového napětí mimo deformovanou oblast viz Obr. 4.1-1 [3, 4].



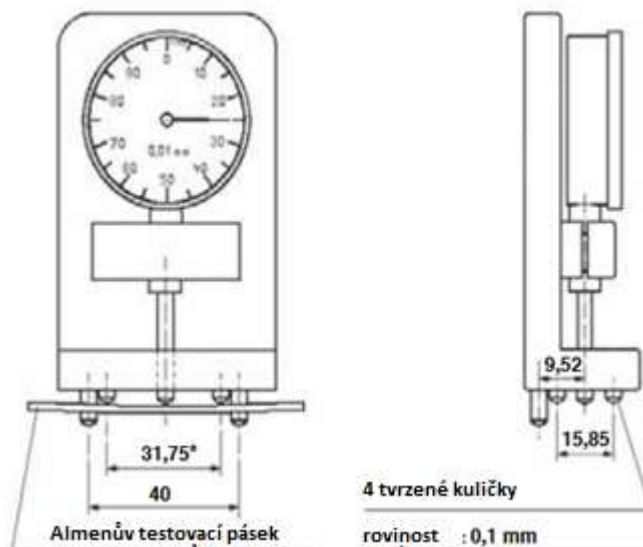
Obr. 4.1-1 Mechanismus metody SP [4]

Tlakové napětí v povrchových a podpovrchových vrstvách materiálu má pozitivní vliv na řadu vlastností – např. na únavovou pevnost. Oproti tomu tahové vnitřní napětí, které vzniká například při svařování v tepelně ovlivněné oblasti, má negativní vliv z důvodu snazšího vzniku a šíření trhlin. Proto je vždy důležité u cyklicky namáhaných komponent dosáhnout na povrchu kladného vnitřního napětí. Na Obr. 4.1-2 je vidět charakteristický profil zbytkového napětí po SP, kde maximální zbytkové napětí je těsně pod povrchem.



Obr. 4.1-2 Průběh zbytkového napětí po SP [4]

První sofistikované měření zbytkového napětí zavedla společnost General motors v roce 1945. Metoda byla založena na měření průhybu tenkých plíšku v čase po SP. Tato metoda byla pojmenována „Almen strip test“. K měření průhybu byl zkonstruován přístroj s názvem „Almen gauge“, který je schematicky znázorněn na Obr. 4.1-3. Tato metoda se používá dodnes pro kontrolu a nastavení procesu SP, zejména při testování součástí leteckého průmyslu [4, 5].

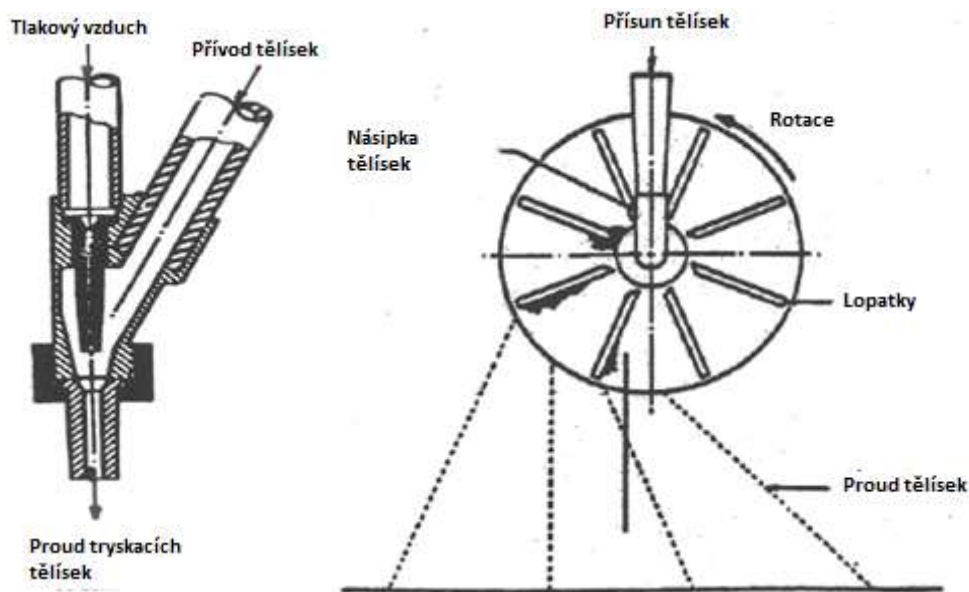


Obr. 4.1-3 Zařízení pro měření průhybu „Almen gauge“ – rozměry v [mm][5]

Literární prameny a odborné články popisují kladný efekt vneseného tlakového napětí, který se promítá do zvýšení únavové pevnosti až o 1000 % u strojních součástí typu vahadla, listové pružiny, zdvihátka, ozubená kola, lopatky turbokompresorů, aj. V praxi je vždy důležité optimalizovat celý proces zpevňování povrchu SP na konkrétní typ materiálu. Kromě zvýšení únavové životnosti může mít SP příznivý vliv i na korozní vlastnosti materiálu. U rotačních součástek pak dokonce i na zlepšení těsnosti ucpávek, jelikož standardně

broušený povrch hřídelí pod těsníci kroužky je mnohdy tvořen defekty ve tvaru břitů, které mohou těsnící segmenty porušit a snížit pak těsnost. SP povrch obsahuje mělké důlky, které jsou oblé, a proto nedochází k tak výraznému porušování břitů těsnících kroužků jako u broušeného povrchu [3].

Tryskáci stroje lze rozdělit podle způsobu urychlení tryskaných tělísek na poháněné vzduchem, vodou nebo rotací metalických kol. Současná zařízení většinou pracují v automatickém či poloautomatickém módu a jsou číslicově řízená. Dále zařízení lze rozdělit na stabilní a mobilní provedení. Schématické uspořádání strojů je na Obr. 4.1-4 [3].



Obr. 4.1-4 Tryskáci stroje poháněné vzduchem (vlevo), metalickými koly (vpravo) [5]

Otryskávací tělíska pro SP se dnes používají především kulového tvaru, který má nejpriznivější účinek na ovlivňovaný materiál. Průměr a druh materiálu tryskáčích kuliček závisí na opracovávaném materiálu a požadovaném vneseném napětí. Pro železné slitiny se nejčastěji používají ocelové kuličky o tvrdosti 46 až 53 HRC. Pro neželezné slitiny pak kuličky na bázi keramiky a skla „Balotina“. Tyto kuličky mají výhodu, že nezanechávají mikročástice na povrchu ovlivňovaného materiálu, které mohou mít negativní vliv na korozní odolnost. Pro stabilitu procesu je důležitá periodická kontrola a výměna otryskávacích tělísek. Průměry otryskávacích kuliček jsou v řádech milimetrů, kdy vždy záleží na otryskávacím stroji a konkrétním použití. Hloubka zpevnění materiálu pomocí kuličkováním se udává okolo 0,25 mm [4].

Moderní kuličkovací stroje jsou schopny otryskávat definované povrchy součástí a jsou plně automatizovány na robotických ramenech. Na Obr. 4.1-5 je zachyceno speciální robotické rameno sloužící pro otryskání obtížně přístupných oblastí strojních dílů, jako jsou například těžko přístupné svary a uložení ložisek [6].

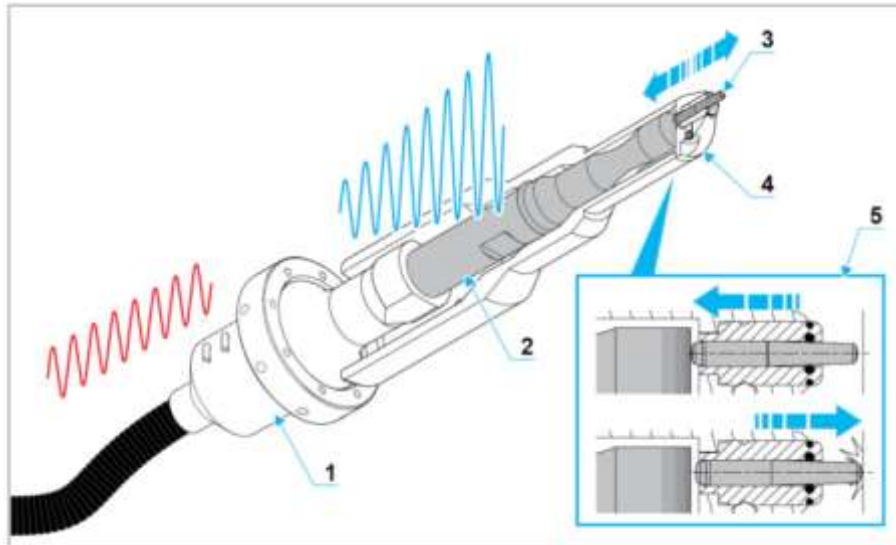


Obr. 4.1-5 Otryskávací robotické rameno [6]

4.2 Ultrazvukové zpevňování povrchu

Jedna z dalších kontaktních metod zpevňování povrchu je Ultrasonic Peening (UP). Tato metoda je známá rovněž pod názvem ultrasonic impact treatment (UIT) a ultrasonic impact peening (UIP). Princip metody je založen na vysokofrekvenčním pohybu indentoru (Impactor), který naráží do povrchu ovlivňované součásti a ultrazvukového oscilátoru pracujícím na bázi piezo generátorů. Ultrazvukový generátor vytváří vysokofrekvenční pulsy, které se pomocí převodníku (Sonotrode) převádí na mechanický přímočarý vratný pohyb indentoru s definovanou kinetickou energií. Indentor poté transformuje mechanickou energii na deformační ve formě plastické deformace povrchu součásti. Na Obr. 4.2-1 je schematicky znázorněna konstrukce UP hlavice pro zpevňování povrchu.

UP technologie se hojně využívá při opracování svarových spojů, kde zejména v tepelně ovlivněné oblasti (TOO), vytváří tlakové vnitřní napětí místo tahového, které je nežádoucí. Výhodou této metody je jednoduchá konstrukce zařízení, velká flexibilita, nízká energetická náročnost a pořizovací cena. Počátky metody jsou datovány k roku 1974, kdy byl v článku „Relieving of welding residual stresses by ultrasonic treatment“ autory I. Polozky, A. Nedoseka, G. Prokopenko prezentován vliv zbytkového napětí u svarových spojů [8]. Hloubka vneseného tlakového napětí je až 1,5 mm, přičemž je hodně závislá na zpevňovaném materiálu a na tvaru součásti [7, 8].

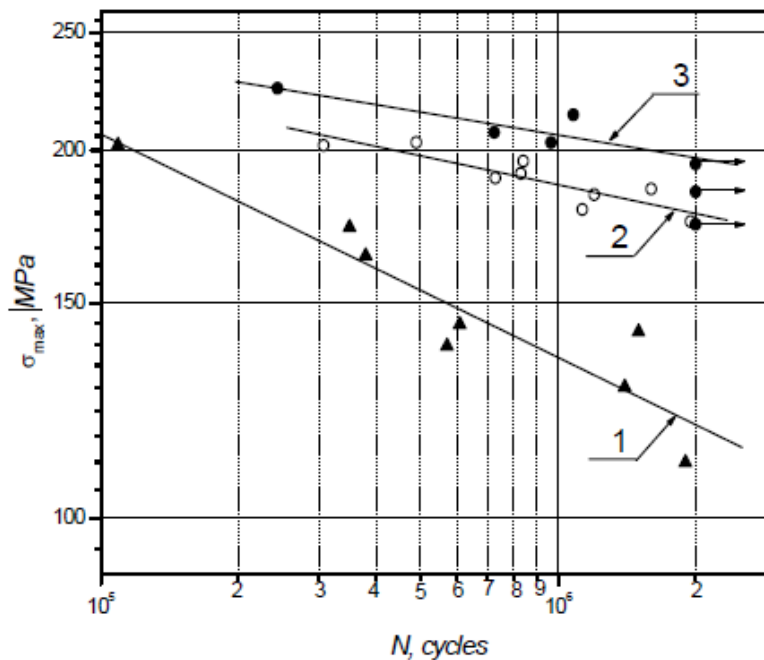


Obr. 4.2-1 UP hlavice, generátor ultrazvukových vln (1), převodník (2), indentor (3), vedení indentrou (4), schéma pohybu indentoru (5) [7]

UP technologie je na trhu běžně dostupná jak v ručním, tak automatickém provedení. Přičemž převažuje spíše ruční pro svou dobrou mobilitu viz Obr. 4.2-2. Na Obr. 4.2-3 je znázorněn Wöhlerův diagram pro dynamické zatěžování svařených trubkových spojů v příčném směru. Materiál trubek je nízkouhlíková konstrukční ocel. Na diagramu jsou znázorněny tři Wöhlerovy křivky, přičemž křivka č.1 je pro materiál ve stavu po svaření bez UP, křivka č. 2 pro svařený materiál modifikovaný metodou UP, křivka č. 3 je rovněž modifikovaný materiál pomocí UP, kdy byl povrch modifikován v průběhu zkoušky vysoko cyklické únavy (VCÚ) v polovině předpokládaného počtu zátěžných cyklů [7, 8].



Obr. 4.2-2 Ruční UP modifikace svarových spojů [8]



Obr. 4.2-3 Wöhlerův diagram po VCÚ svařeného materiálu, křivka 1 – bez UP úpravy, křivka 2–s UP úpravou, křivka 3–s UP úpravou po 50% cyklů životnosti [8]

Z Obr. 4.2-3 vyplývá, že UP modifikace zbytkového napětí na svarovém spoji měla významný vliv na únavovou životnost, kdy ovlivněný povrch svaru, který byl zatěžován téměř dvakrát vyšším napětím, dosahoval stejné či větší životnosti. Dále je patrné, že v průběhu cyklicky namáhaných vzorků je výhodné inkriminované oblasti opakovaně UP zpevňovat a vnášet do nich tlakové zbytkové napětí. Na Obr. 4.2-4 je vidět svarový spoj před a po modifikaci metodou UP.

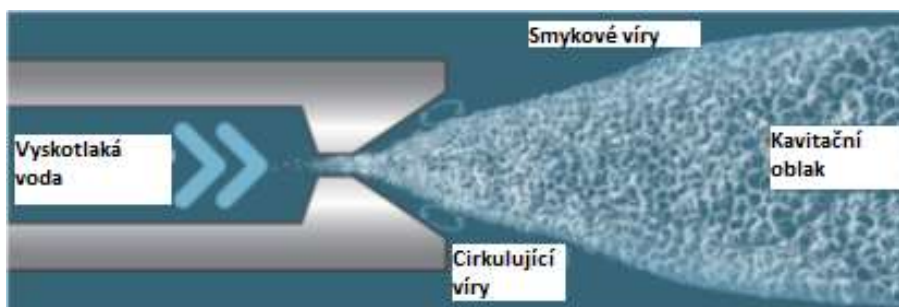


Obr. 4.2-4 Svarový spoj před [vlevo] a po [vpravo] UP modifikaci [7]

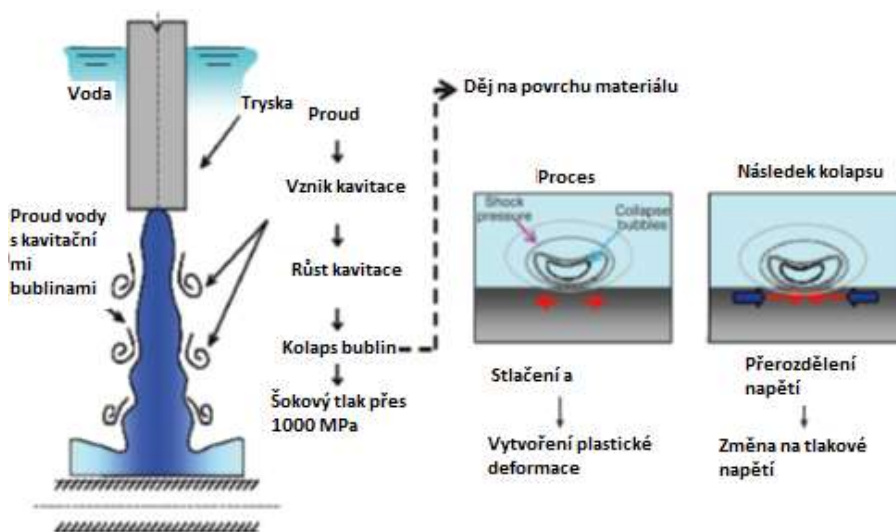
4.3 Zpevňování povrchu vodní paprskem Water Jet Peening (WJP)

WJP technologie se řadí mezi bezkontaktní metody zpevňování povrchu. Je založena na principech vzniku kavitačních jevů. Princip metody je znázorněn na Obr. 4.3-1, kde zdroj vysokotlaké vody prochází tryskou, která je ponořena ve vodě. Na rozhraní proudu vysokotlaké vody o vysoké rychlosti s prostředím klidné vody vzniká silné smykové napětí. Tato složka smykového napětí způsobí vznik vírů, které indikují turbulence. Vzniklé víry a turbulence

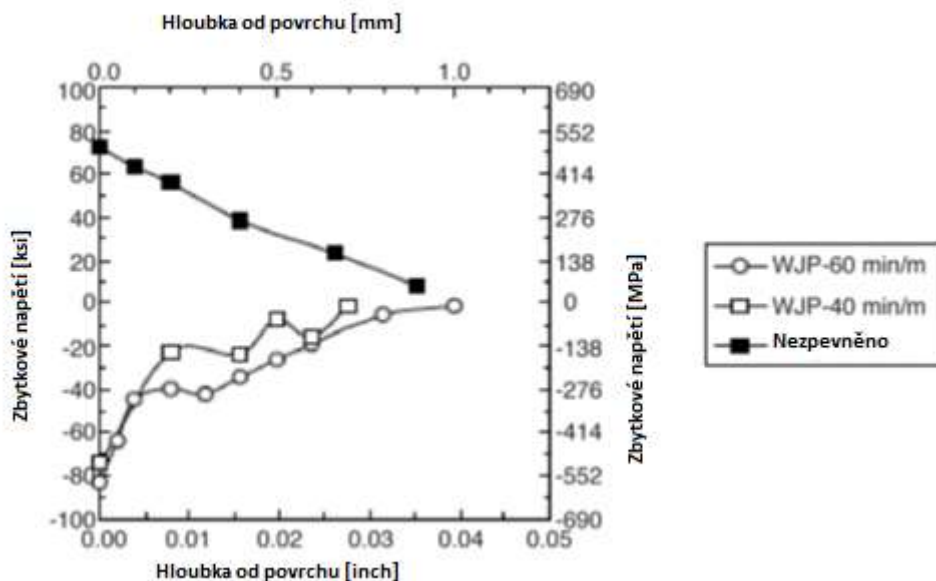
zapříčiní lokální pokles tlaku až na úroveň, kdy dochází k varu vody a vzniku bublin. Tento proces se nazývá kavitace. Vzniklé kavitační bubliny tvoří kavitační mrak, který je urychlen proudem vysokotlaké vody vycházející z trysky. Se vzrůstající vzdáleností od trysky dochází ke snížení rychlosti vodního proudu a k rozptylování vírů. Tím dochází k vyrovnání tlaku na hodnotu okolního tlaku vody a kolapsu vytvořených kavitačních bublin. Rozpadem vzniklých kavitačních bublin vzniká silná rázová vlna o hodnotě cca 1000 MPa. Takto vzniklá rázová vlna interaguje s povrchem kovového materiálu a způsobí lokální plastickou deformaci s vnesením tlakového napětí do povrchových vrstev materiálu. Vznik vytvořené tlakové vlny je zobrazen a popsán na Obr. 4.3-2. Tento způsob zpevňování povrchu se již používá u tlakových reaktorových nádob. Technologii WJP lze dosáhnout zpevnění materiálu až 0,8 mm [8], přičemž závisí na materiálu a tvaru součásti. Příklad průběhu zbytkového napětí v oceli 316 L bez a s WJP je uvedeno na Obr. 4.3-3 [8].



Obr. 4.3-1 Schéma trysky WJP dle AREVA [9]



Obr. 4.3-2 Princip a vznik tlakových vln pro zpevnění metodou WJP [9]



Obr. 4.3-3 Průběh zbytkového napětí oceli 316L SS bez a se zpevněním metodou WJP [9]

4.4 Popis technologie Laser Shock Peening (LSP)

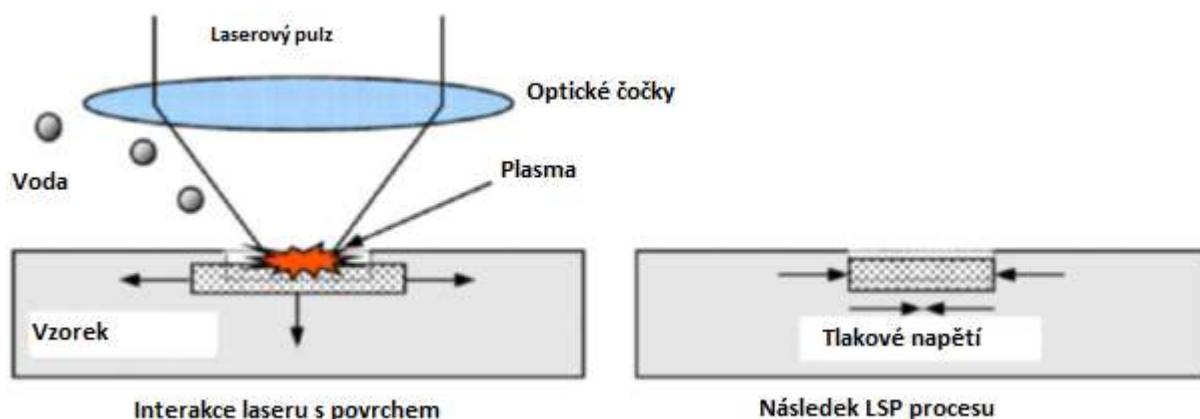
Laser Shock Peening metoda se řadí mezi moderní bezkontaktní technologie zpevňování povrchu kovových materiálů. Zpevnění je dosaženo prostřednictvím rázových tlakových vln, které se generují interakcí laserového paprsku s povrchem materiálu nebo s ablační ochrannou vrstvou, která se nanáší na povrch materiálu. Princip technologie byl objeven v roce 1963 v USA, kdy byl použit pulsní laser ke generování tlakových vln, které plasticky deformovaly povrch kovových materiálů. Princip metody byl studován a vyvíjen v Battele Columbus Laboratories (OH, USA) mezi léty 1968-1981 [2]. Po roce 1968 byla metoda LSP studována a hledalo se její uplatnění v průmyslu. Mezi nejvýznamnější země, které se dané problematice věnovaly kromě USA byla Francie od roku 1991 (Ballard, Peyre and Fabbro a další), Čína od roku 1996 (Zhang, Cai a Guo [2]) a Japonsko od roku 1997 (Sano) [2]. V roce 1974 byly prvně patentovány procesy LSP technologie, které byly jednoznačně prokázány profesory Mallozi a Fairand [2]. Velký vliv na vývoj a uplatnění LSP technologie má vývoj vysokovýkonných pulsních laserů s přesným řízením energie a frekvence (Mannava, 1998) [2].

LSP technologie se začala hojně používat v letectví na komponentech ze slitin na bázi oceli, hliníku, titanu, niklu a dalších. V roce 1997 se poprvé modifikovaly metodou LSP lopatky a rotory turbín (Mannava and Feringo), v roce 2001 byla technologie LSP úspěšně použita k modifikaci ozubených kol, hřídelí a ložisek (Feringo et al.) [2]. LSP technologie se začala používat v širokém spektru komponent, a to včetně spojovacích prvků. LSP technologie se začala uplatňovat při opravách starších komponent za účelem potlačení vzniku a šíření trhlin. V roce 1997 US Air Force zavedla ochranu turbín proti cizím tělesům, tzv. Foreign Object Damadge (FOD) (Zhang et al. [2]). General Electric Aircraft Engines modifikuje pomocí LSP náběžné hrany turbín pro zvýšení životnosti (Mannava et al., 1997 [2]). Na taktickém bombardéru B-1B se technologie LSP využívá pro zvýšení odolnosti proti FOD. Tato technologie se uplatnila i na letadlu Lockheed Martin F-16C/D (Obata et al., 1999) [2]. Zpracování lopatek turbokompresoru technologií LSP je uvedeno na Obr. 4.4-1.



Obr. 4.4-1 Zpracování lopatek turbokompresoru technologií LSP [29]

Schematické uspořádání LSP procesu je znázorněno na Obr. 4.4-2. Při velmi krátké interakci laseru s kovovým povrchem o délce několika nanosekund se oblast povrchu materiálu zahřeje na teplotu dosahující až 10 000 °C a dojde k vypařování materiálu a vzniku plazmy. Plazma absorbuje energii laseru a generuje vysoký tlak, který se ve formě rázových vln šíří do kovového materiálu. Generovaný tlak dosahuje několika desítek GPa. Interakce plazmy s kovovým povrchem bez povlaku se nazývá „direct ablation“. V praxi je povrch materiálu obvykle pokryt černým povlakem či nátěrem nebo hliníkovou páskou. Technice, při které je povrch pokryt barvou či páskou a chrání povrch materiálu a zvyšuje absorpci energie laseru, se říká „con-fined ablation“ [9].

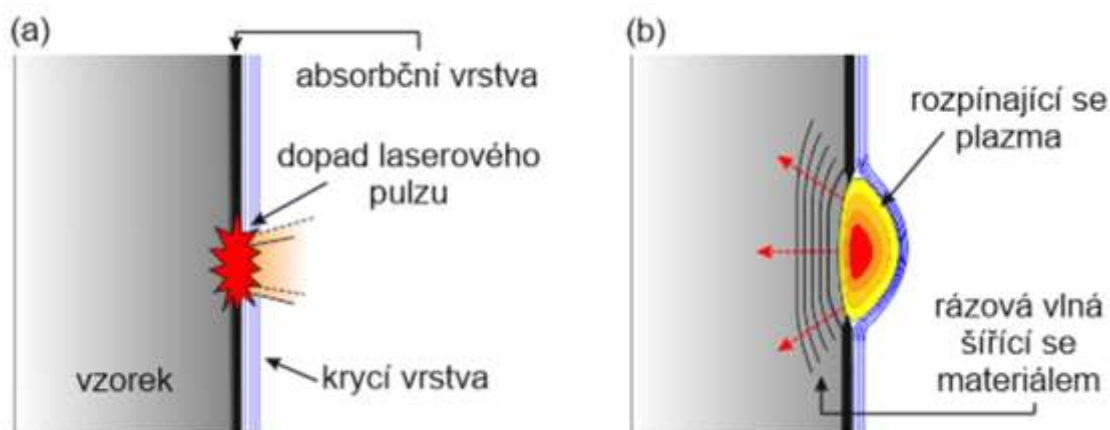


Obr. 4.4-2 Schematické uspořádání LSP procesu [2]

4.4.1 Princip LSP

Technologie LSP je založena na vzniku vysokotlaké plazmy, která vytvoří tlakovou vlnu a způsobí tím plastickou deformaci materiálu. Vysokotlaká plazma vzniká interakcí laseru s povrchem materiálu či ochranou ablační vrstvou. Pro potlačení tepelného ovlivnění materiálu je povrch materiálu zpravidla pokryt tenkou ablační vrstvou, což nejčastěji bývá

černá lepicí páska nebo černá barva. Tato vrstva napomáhá absorpci laserového záření, ale hlavně pak chrání povrch vzorku před tepelnými jevy, které doprovázejí absorpci laserového pulsu. Působení na vzorek je pak čistě mechanického rázu [11]. Při ovlivnění povrchu materiálu laminárně ztéká uniformní vrstva vody po povrchu materiálu či ablační vrstvě, jejíž funkcí je dočasné fixování vzniklého rozpínajícího se plazmatu na povrchu vzorku, což vede ke vzniku déle trvajících mechanických tlaků (desítky ns) o větší velikosti (jednotky GPa) [12]. Díky tomuto jevu není k dosažení vysokých tlaků potřeba vakua [11, 12]. Dopadající laserový puls je fokusován čočkou, projde vodní vrstvou a odpaří malou část absorpční vrstvy (Obr. 4.4-3 (a)). Vznikne rapidně se rozpínající plazma, které absorbuje zbytek pulsu. Plošná hustota výkonu se přitom pohybuje od 1 do 10 GW/cm² [12]. Při rozpínání plazmatu vzniká rázová vlna, která se šíří materiálem (Obr. 4.4-3 (b)). Pokud je tlak dostatečný, dojde k překročení dynamické meze kluzu materiálu a v místě dopadu pulsu vznikne lokální plastická deformace. To má za následek vznik tlakových zbytkových napětí sahajících až do hloubky větší než 1 mm [12]. K rovnoměrnému ovlivnění větší plochy se obvykle vzorek vůči laseru posouvá a jednotlivé pulsy se tak skládají vedle sebe v předem definovaném vzoru s překryvem.



Obr. 4.4-3 Schéma LSP procesu. Dopadající laserový puls odpaří absorpční vrstvu a mezi vzorkem a vodní vrstvou vznikne expandující plazma, které v materiálu vyvolá rázovou vlnu [11]

4.4.2 Interakce laseru s materiálem

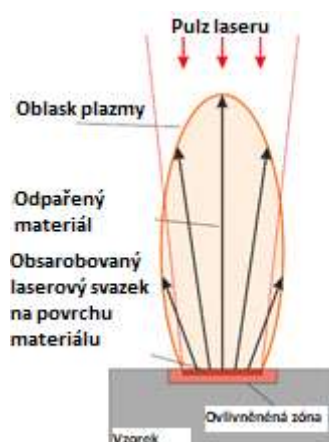
Při interakci světla v tomto případě ve formě laseru s hmotou, dochází k odrazu světla od hmoty zpátky do prostoru a zbylá část fotonů laserového svazku díky diskontinuitě indexu lomu prochází materiálem. Výpočet podílu odražené světelné energie a pohlcené energie vychází z Fresnelovy rovnice (4-1), přičemž n je index lomu materiálu, λ vlnová délka laseru, T absorpce a R odrazivost materiálu [13].

$$R = \left(\frac{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \right)^2; T = 1 - R \quad (4-1)$$

Odráživost kovových materiálů v infračerveném vlnění je mezi 0,8 až 0,99. Dalším faktorem ovlivňujícím poměr odrazivosti k absorpci je stav povrchu, a to zejména drsnost povrchu. Tento parametr není zahrnut ve Fresnelově rovnici. Se zvyšující se drsností povrchu kovového materiálu roste absorpce světla. Intenzita pronikání světla pod povrch materiálu klesá s hloubkou. Tento děj popisuje Beer-Lambertův zákon (4-2) [13]. Φ_0 je vstupní zářivý tok, Φ je výstupní zářivý tok, c je koncentrace absorpční složky, ϵ_λ je molární absorpční koeficient při vlnové délce λ a l je délka absorpční vrstvy [13].

$$\phi = \phi_0 * 10^{-\epsilon_\lambda c l} \quad (4-2)$$

Jedním z klíčových procesů při LSP je laserová ablace krycí vrstvy či samotného materiálu. Laserovou ablaci lze popsat jako proces, při kterém dochází ke změně skupenství z pevného stavu na plazmu. V důsledku popisovaného procesu dochází k odprašování materiálu z povrchu. Nicméně úbytek materiálu lze označit jako zanedbatelný – pohybuje se v řádu mikrometrů. Pro vznik laserové ablace musí mít laserový puls dostatečnou hustotu energie. Pro dosažení zpevnění povrchu kovových materiálů pomocí technologie LSP je vyžadována hustota energie přibližně 1–10 J/cm² [12]. Při používání nanosekundových laserů ve vzduchu, které jsou typické pro technologii LSP, dochází především u kovů k doprovodnému jevu, kterým je rozptylování tepelné energie do okolí materiálu. K tomuto doprovodnému efektu dochází z důvodu pomalé rychlosti ablace a dostatečnému času na přenos tepla do materiálů radiací. Důsledkem je tepelné ovlivnění materiálu vznikem tepelně ovlivněné zóny [12, 15]. Na Obr. 4.4-4 je ilustrativní schéma ablačního procesu.



Obr. 4.4-4 Ablační proces při interakci laseru s povrchem materiálu [15]

V průběhu ablace dochází k ionizaci par materiálu a zvyšování teploty par. To má za následek vznik vysokotlaké plazmy. Plazma se generuje všemi směry. V plazmě dochází k rychlému nárůstu teploty a tlaku a zapříčiní rychlou expanzi plazmy. V důsledku expanze plazmy dojde k vytvoření rázové vlny, která se šíří do materiálu. Pro zamezení odrazu rázové vlny od povrchu materiálu je povrch materiálu smáčen laminárním proudem vody, který funguje jako štít.

Pokud amplituda tlakové vlny překročí Hugoniotův elastický limit (HEL) neboli dynamickou mez kluzu, je materiál plasticky deformován.

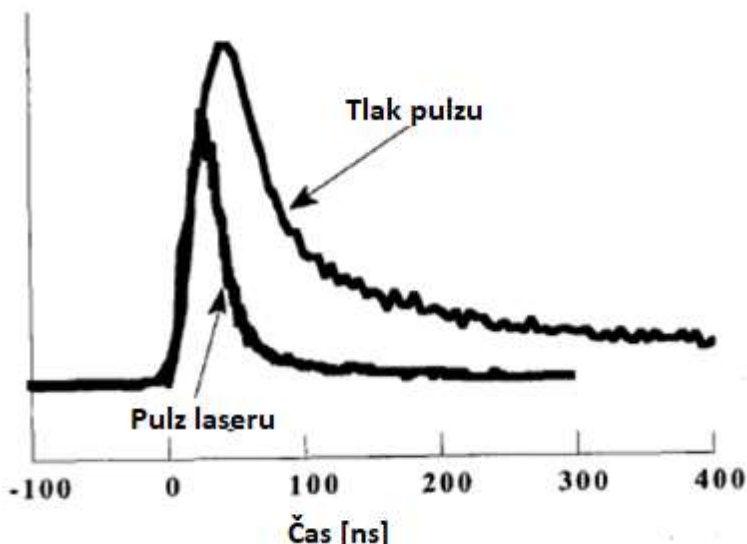
Při poklesu tlaku pod HEL dojde k zastavení rozvoje plastické deformace. V důsledku plastické deformace dojde ke zvýšení trvalého tlakového zbytkového napětí v místě plastické deformace. Nejvyšší zbytková napětí jsou nejčastěji na povrchu či těsně pod povrchem materiálu. S hloubkou se hodnota vneseného zbytkového napětí snižuje [12, 13].

4.4.3 Požadavky na LASER a zařízení pro LSP

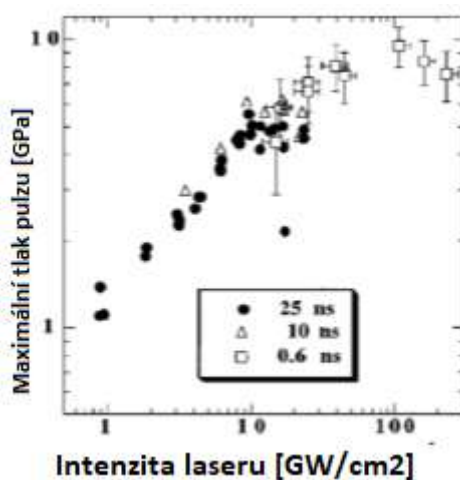
Pro správnou funkci a efektivitu technologie LSP je nezbytný správný výběr laserového zdroje. Pro LSP technologii se nejčastěji používají Q-switched pulsní lasery. Q-switched laser je tvořen elektro-optickým převodníkem, který zajišťuje impulsní výstupní paprsek. Pro technologii LSP se nejčastěji používají pevnolátkové neodymové lasery – Nd: Glass nebo Nd:YAG lasery [16].

Používaná vlnová délka laserů se dělí na viditelné a neviditelné záření pro člověka. V praxi se nejčastěji používá laser s vlnovou délkou 1064 nm – infračervené záření. Dále se pak používají záření s vlnovou délkou 532 nm – se zeleným spektrem. Tento typ záření má výhodu při použití ve vodě, jelikož nedochází k pohlcování energie laseru ve vodním prostředí [16].

Pro efektivitu a hospodárnost využití LSP je důležitá obnovovací frekvence impulsu laseru. Pro LSP technologie se nejčastěji používají lasery s dobou pulsu mezi 1-100 ns. Doba pulsu přímo ovlivňuje velikost tepelného ovlivnění materiálu. Při použití naopak krátké doby pulsu nemusí dojít k dostatečné době vývinu tlakové plazmy a stlačení materiálu. Proto se doba pulsu volí dle energie pulsu daného laseru, tloušťky ablační vrstvy, počtu vrstev, velikosti překrytí a dalších parametrů. Na Obr. 4.4-5 je zobrazena závislost doby pulsu na velikosti tlaku v plazmě. Z Obr. 4.4-6 je patrné, že při delší době pulsu dochází ke zvýšení tlaku plazmatu, ale také ke zvýšení tepelného ovlivnění materiálu. Při použití doby pulsu nad 100 ns dochází k poklesu tlaku. Proto se lasery s delší dobou pulsu více jak 100 ns pro aplikace LSP nedoporučují používat. Při použití doby pulsu menší jak 0,1 ns nedojde při interakci laseru s povrchem ablační vrstvy k vývinu plazmy a povrch je pouze odprášen [17]. Lasery s krátkou dobou pulsu 0,1 ns se úspěšně používají pro mikro obrábění [17].



Obr. 4.4-5 Vliv délky pulsu na velikost tlaku plazmatu při LSP [18]



Obr. 4.4-6 Vliv délky pulsu a hustoty pulsu na velikost tlaku plazmatu při LSP [15]

U klasických LSP laserů se používají lasery s výkonem od 0,5 do 10 J. Důležitým parametrem při aplikaci laseru je hustota pulsu, která je definovaná energií pulsu na jednotku plochy. V laserové terminologii se tento parametr nejčastěji uvádí v jednotce GW/cm^2 [2]. Laserový paprsek lze fokusovat na definovanou velikost stopy, a tudíž lze úspěšně používat i pulsní lasery s relativně nízkou energií pod 2 J. Pro zvýšení hospodárnosti se u nízkoenergetických laserů zvyšuje opakovací frekvence až na 200 Hz. Nízkoenergetické lasery jsou oproti vysokoenergetickým laserům podstatně levnější a spolehlivější [2, 17].

Kromě použití pulsních laserů je technologie LSP spjatá s robotizací, která zaručuje přesné polohování součásti či laserového svazku v průběhu zpracování. K tomuto účelu se nejčastěji využívají víceosá robotická ramena, která jsou schopna s přesností setin milimetru definovaně polohovat zpracovávanou součást. Kromě polohování součásti či laseru je důležité vždy zaručit laminární proudění vody při zpracování na vzduchu viz Obr. 4.4-7 a Obr. 4.4-8, či cirkulaci vody při LSP pod vodou.



Obr. 4.4-7 Robotické rameno se zpracovávaným vzorkem



Obr. 4.4-8 Smáčení povrchu vzorku vodou při LSP procesu

4.4.4 Parametry LSP procesu

Pro získání optimálních výsledků pro LSP zpracování povrchu materiálu či komponenty je nezbytná optimalizace LSP procesu. Z provedených experimentů vyplývá, že základní parametry, které se nastavují jsou:

- **Energie Pulsu [J]** – základní parametr pulsního laseru, který je vždy limitován výkonem pulsního laseru pro aplikaci v LSP se volí 0,5 – 10 J
- **Vlnová délka laseru [nm]** – pro aplikace v LSP procesu se nejčastěji používají dva základní typy vlnových délek laseru: 1064 nm – infračervené záření pro aplikaci na vzduchu či ve vakuu a 532 nm – se zeleným spektrem pro aplikaci ve vodě
- **Doba pulsu [ns]** – parametr udává časový interval jednoho pulsu, tento parametr je většinou dán typem použitého laseru
- **Frekvence pulsů** – parametr udává rychlost „kadenci“ výstřelů laseru
- **Prostředí při LSP procesu** – v závislosti na požadavcích aplikace LSP v průmyslu a na typu LSP stanice se nejčastěji používají dva typy prostředí: na vzduchu a ve vodě. Každé prostředí má své výhody a nevýhody. Při aplikaci na vzduchu se zpravidla musí používat ochranné ablační vrstvy, které chrání povrch materiálu. Proces je však z pohledu vyvinutého tlaku plazmy účinnější a méně náročný z pohledu uplatnění v průmyslu. Ve vodě se zpravidla povrch materiálu nechraňuje ablační vrstvou, tudíž se mohou použít pulsy s vyšší hustotou energie. Použití vody je však komplikovanější při aplikaci v praxi. Další prostředí mohou být vakuum, inertní plyn. Pro komplikovanost udržení těchto prostředí se zpravidla v praxi nepoužívají.
- **Typ ochrany povrchu materiálu** – pro ochranu povrchu materiálu při zpevňování na vzduchu se obvykle používají tzv. ochranné ablační vrstvy, které mají dva základní úkoly. Prvním je ochrana povrchu materiálu před oxidací a odprášení materiálu vlivem interakce laseru s materiálem. Druhým základním úkolem je maximální pohlcení laserové energie a přeměny na vysokotlaké plazma, které způsobí rázovou vlnu. V praxi se nejčastěji používají dva základní typy: černá vinylová páska s lepidlem a hliníková páska s lepidlem. Další možnosti je použití ochranných povlaků na bázi syntetických barev, silikonů atd.
- **Tvar svazku laseru** – pulsní lasery mají tři základní tvary svazku. Nejčastější je kruhový, který však z pohledu modifikování plochy není optimální z důvodu horšího překryvu stop. Dalším typem je hexagonální, který vykazuje rovnoměrnější překryv. V současné době se začínají používat lasery se čtvercovou stopou, která je z pohledu překryvu stop nejvýhodnější. Častým problémem však může být nerovnoměrná hustota energie ve středu na krajích stopy.
- **Velikost stopy svazku [mm]** – určuje průměr či velikost strany pulsu, tento parametr má vliv na hustotu pulsu
- **Hustota pulsu [GW/cm²]** – parametr určující intenzitu energie laseru vztaženou na plochu stopy laseru. Tento parametr se nastavuje v závislosti na použití typu ochranné vrstvy a prostředí, kde se zpevňování provádí (voda, vzduch, vakuum)
- **Překrytí pulsů v řádku [%]** - tento parametr udává procentuální překrytí stop laseru v jednom řádku. Překrytí jednotlivých stop je důležité pro získání homogenního vnesení tlakového napětí a zlepšení jakosti povrchu
- **Překrytí pulsů v ploše [%]** - tento parametr udává celkové procentuální překrytí stop laseru v řádku a sloupci. Překrytí stop je důležité pro získání homogenního vnesení

tlakového napětí a zlepšení jakosti povrchu. Je však značně limitováno při použití ochranných vrstev na vzduchu.

Proces optimalizace LSP procesu se téměř vždy provádí v laboratorních podmínkách, kde se na základě požadavků na zlepšení mechanických, strukturních či korozních parametrů provede rozvaha, jaké nastavení procesu LSP se použije. Nezbytné je vědět, jaké jsou možnosti použití LSP na dané komponentně v praxi. Zdali je možné součást zpevňovat na vzduchu nebo ve vodě, zda lze použít ochranné ablační vrstvy, jaká je polohovatelnost součásti či laserového svazku a další.

Pro experimenty v této disertační práci byly použity především laserové systémy pracující na vzduchu s ochranou ablační vrstvou na bázi vinylové pásky, která byla smáčena vodním filmem. Tento způsob zpevňování LSP technologií patří k nejvíce rozšířeným.

Výhody takto nastaveného LSP procesu spočívají zejména v jednoduchosti a ochraně zpevňovaného materiálu před tepelným a korozním účinkem laseru. Tento proces má však své limity, a to především v použité velikosti hustoty energie pulsu, velikosti překryvu, nutnosti měnit ochranou pásku.

Pro zvolení správných LSP parametrů je na začátku optimalizace procesu nutné znát limity ochranné pásky jakými jsou: maximální hustota pulsu při které nedochází k ionizaci ve vzduchu a rozptylu svazku a maximální možný překryv stop pulsů v řádku a sloupci. Z experimentálních zkoušek je známo, že limitujícím parametrem z pohledu použité hustoty pulsu je odolnost ochranné ablační pásky.

Při LSP procesu bez použití ablační pásky na vzduchu je hodnota hustoty pulsu limitována hodnotou, při které dochází k ionizaci vzduchu a ztrátě energie dopadajícího laserového svazku.

4.4.5 Nastavení maximální energie pulsu pro ochranu ablační pásky

Pro určení limitu ochranné ablační pásky proti protržení a propálení se vždy provádí zkouška založená na zvyšování energie do místa dopadu laseru, viz Obr. 4.4-9. V praxi mají pulsní lasery jmenovitou energii, která se většinou nedá přesně měnit, proto se pro optimalizaci parametru hustota pulsu bere energie laseru jako konstanta a mění se velikost stopy svazku. Velikost stopy pulsu se mění změnou ohniskové vzdálenosti laseru k povrchu materiálu. V praxi se vytvoří krátký program, který se skládá z cca 6 až 20 „výstřelů“ s různou velikostí stopy svazku při stejné energii laseru. Poté se na základě vizuální kontroly pásky, kde se hodnotí, zdali páska není protržená či propálená, vybere optimální velikost stopy svazku.



Obr. 4.4-9 Zkušební série „výstřelů“ pro hodnocení odolnosti pásky

4.4.6 Nastavení překryvu jednotlivých stop

Nastavení překryvu stop patří mezi hlavní parametry, které se ladí pro konkrétní ochranou vrstvu a zpevňovaný materiál. Překrývání jednotlivých stop je důležité pro dosažení homogenního vneseného tlakového napětí a jakosti finálního povrchu po LSP. Nevýhodou použití velkého překryvu, který je obvykle příznivý, je podstatně větší namáhání a opotřebení

ochranné vrstvy. Z tohoto důvodu se často přelepují pásy mezi zpevňováním jednotlivých řádků. Správnou volbou překryvu v řádku a sloupců lze vytvořit velmi jakostní povrch. Proces nastavení překryvu je obdobný procesu nastavení energie pulsu pro ochrannou ablační vrstvu s tím, že se provádí několik sérií „výstřelů“ např. 5 s daným procentuálním překryvem v jednom řádku. Standardně se „nastřílí“ 3 až 8 řádků s různým procentuálním překryvem, viz Obr. 4.4-10, a následně se vizuálně zkontroluje páska jako při hodnocení odolnosti pásy. Pro optimalizaci celkového překryvu v ploše se místo jednotlivých řádků „nastřílí“ čtverce. Překryv jednotlivých řádků, který se může blížit 100 %, lze řešit přelepováním pásek po jednotlivých řádcích.



Obr. 4.4-10 Zkušební série výstřelů pro optimalizaci překryvu

4.4.7 Volba strategie „střelby“ - umístění a pořadí stop

Jedna z největších výhod technologie LSP je přesně definované rozmístění stop – „výstřelů“ na zpevněné ploše s definovanou energií pulsu, velikostí stopy, překryvem atd. Na základě těchto parametrů a znalosti materiálových vlastností lze LSP proces úspěšně simulovat metodou konečných prvků (MKP). Na základě simulace lze definovat redistribuci zbytkových napětí v materiálu po LSP. Řízeným umístěním jednotlivých „výstřelů“ lze přesně přesunout příznivé tlakové napětí do nejvíce exponované oblasti.

4.5 Srovnání metod zpevňování povrchu

Z výše uvedených informací o možnostech zpevňování povrchů cizími tělísky, ultrazvukovou metodou, kavitační metodou či pulsním laserem lze říci, že tradiční způsob kuličkování dosahuje nejnižších hloubek zpevnění. Oproti tomu LSP nejvyšších hloubek, viz Tab. 4-1. Důležité je však říci, že každá technologie krom maximální hloubky zpevnění je limitována pro konkrétní aplikaci, a to jak z pohledu mobility, tvarové náročnosti zpevňované plochy, tak ekonomiky provozu. Mezi největší přednosti LSP je hloubka vneseného tlakového napětí, přesné umístování jednotlivých „výstřelů“ a přesně definovaná energie do místa zpevnění. Na druhou stranu je LSP stále drahá technologie, která je určena pro aplikace s vysokým důrazem na bezpečnost a životnost. Mezi nadějně technologie patří Water Jet Peening, který je založen na kavitačním principu. Mezi jeho největší výhody patří možnost zpevňovat tvarově složité povrchy na vzduchu. Vnesené napětí je však do cca 2x nižší hloubky [1, 2, 7, 9].

Tab. 4-1 Porovnání hloubky zpevnění na oceli [1, 2, 7, 9]

| | Maximální hloubka vneseného tlakového napětí u ocelí [mm] |
|---------------------|---|
| Laser Shock Peening | 2,5 |
| Shot Peening | 0,25 |
| Ultrasonic Peening | 1,5 |
| Water Jet Peening | 0,8 |

4.6 Zbytková napětí

Zbytková napětí lze zjednodušeně definovat jako napětí v materiálu, které se v materiálu nachází bez působení vnějších sil. Způsob vzniku zbytkových napětí může být způsoben pružně plastickým stavem ke kterému dojde v lokálním místě materiálu [48]. Zbytková napětí v materiálu mohou být přínosná (zejména tlaková), ale i škodlivá (zejména tahová) v závislosti na typu a rozložení v materiálu. V polykrystalických materiálech lze zbytková napětí rozdělit do 3 základních druhů: [48]

- 1. druhu (makroskopická) mohou být způsobena například: - výrobní technologií (obrábění, spojování, lití, tvářeni, tepelné zpracování, povrchové úpravy povrchu) - montážním, dopravním, provozním, zkušebním či jiným zatížením různého charakteru
- 2. druhu vznikají (mikroskopická): - při tepelných procesech v materiálu s fázemi majícími rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti při deformaci materiálu skládajícího se buď z jedné fáze (jejíž zrna jsou však různě orientována k silovému toku a jejichž mez kluzu je anizotropní) nebo z více fází s různými mech. vlastnostmi
- 3. druhu (submikroskopická): nejsou důsledkem strukturních poruch (bodových, čárových, plošných atd.) [48]

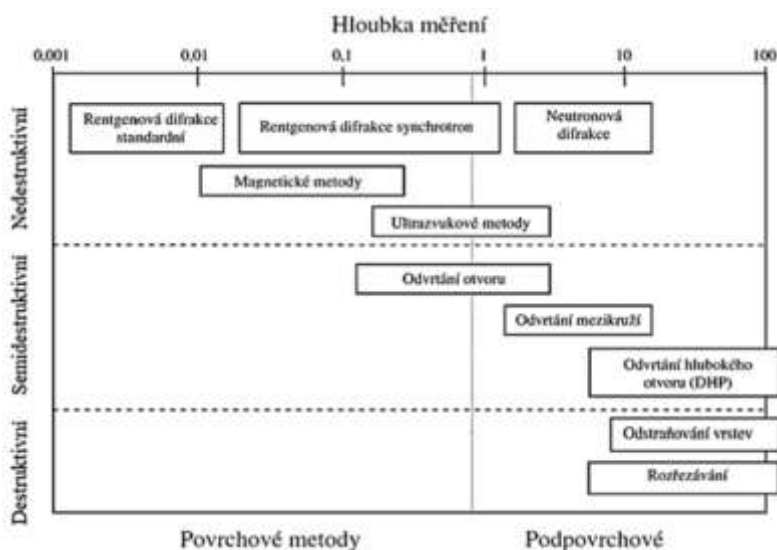
Mezi přínosná zbytková napětí se řadí napětí tlakového charakteru, a to především v kritických místech materiálu, která jsou nejvíce náchylná ke vzniku a šíření trhlin. Taková místa jsou především v blízkosti povrchu materiálu, která jsou často nejvíce namáhána. Typickým příkladem jsou únavové namáhání nebo korozní praskání, kdy místo iniciace trhlin je zpravidla na povrchu materiálu. Vnesením tlakového napětí různými metodami do nejvíce kritických míst lze potlačit vznik a rychlost šíření trhlin [48].

Přítomnost tahových napětí v materiálu je obvykle nežádoucí, a to především v nejvíce namáhaných místech, jakými jsou: technologické vruby, defekty v materiálu, korozní body atd. Tahové napětí oproti tlakovým napětím zlepšují podmínky v materiálu pro vznik trhlin a šíření trhlin [48].

4.7 Měření zbytkového napětí

Jak již bylo v předchozích kapitolách nastíněno, je cílem LSP vnést tlakové napětí do kritických míst materiálu, a proto je důležité měřit zbytkové napětí. V současné době existuje několik metod měření zbytkových napětí (RS) v materiálu. Z pohledu poškození zkušebního tělesa lze rozdělit metody do tří základních typů: nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní [23]. Metody, při kterých nedojde k poškození vzorku, jsou založeny na principu závislosti fyzikálních vlastností a stavu vnitřního napětí, například difraktometrická metoda „XRD“ využívající rentgenovou difrakci. Destruktivní či semidestruktivní metody využívají změnu deformace při odebrání materiálu například odvrtávací metoda „Hole drilling“. Rozdělení metod je schematicky uvedeno na Obr. 4.7-1 [48].

Nejčastěji používané metody měření RS jsou XRD a „Hole drilling“. Obě metody umožňují relativně přesné měření zbytkového napětí. Pro zvýšení přesnosti měření je možnost obě metody kombinovat [10, 48].



Obr. 4.7-1 Rozdělení metod měření zbytkových napětí [10]

4.7.1 XRD metoda

XRD neboli difraktometrická metoda je založena na principu měření posunů difrakčních křivek, které jsou vyvolány vnějším namáháním nebo zbytkovým napětím. Použitím Hookova zákona pro elastickou oblast a známého modulu pružnosti daného materiálu se naměřená deformace přepočítá na napětí. Oblast a hloubka měření je závislá na analyzovaném materiálu. Hloubka penetrace rentgenového paprsku je závislá na koeficientu absorpce materiálu. Pro ocelové materiály se pohybuje v rozmezí 3 až 30 μm [47]. V Tab. 4-2 jsou uvedeny hloubky absorpce rentgenového záření v závislosti na typu použité katody [23, 47].

Tab. 4-2 Absorpční hloubka při měření XRD [47]

| Záření | Ti K α | Cr K α | Cu K α |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Vlnová délka [nm] | 0,27496 | 0,22909 | 0,15412 |
| Absorpční hloubka [μm] | 6,66 | 11,22 | 35,96 |
| Difrakční úhel [hkl] | 73,03° (220) | 78,69° (222) | 81,41° (511) |

Proto je tato metoda vhodná pro měření zbytkového napětí na povrchu materiálu. Pro vytvoření hloubkového profilu je nutné postupné odstraňování materiálu a opakované XRD měření. Úběr materiálu se nejčastěji provádí elektrochemickým odleptáváním, kdy dochází k minimalizaci plastické deformace povrchu [23].

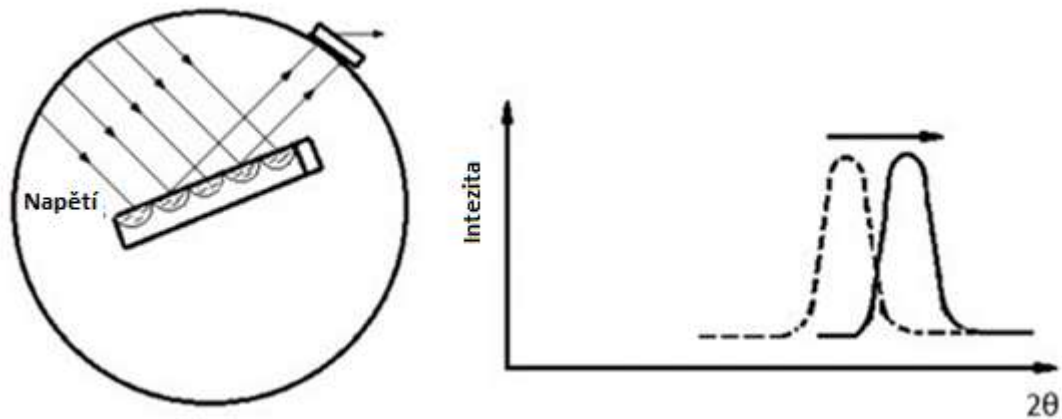
Podmínka difrakce vychází z Braggovy rovnice:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin(\theta) \quad (4-3)$$

kde λ je vlnová délka, 2θ je difrakční úhel a d je vzdálenost mřížkových rovin materiálu.

Pro měření zbytkového napětí je vždy nutné znát krystalovou mřížku analyzovaného materiálu, Poissonovu konstantu a modul pružnosti v tahu. Na základě zmíněných veličin jsou zvoleny provozní parametry difraktometru. Pro měření deformace na základě posunu

mřížkových rovin je vždy vybrán dominantní difrakční vrchol. Větší difrakční úhel 2θ přináší vyšší citlivost měření, vyšší přesnost naměřených deformací a vypočtené zbytkové napětí. Proto je snaha volit co největší difrakční úhel. Jakákoliv změna vzdálenosti krystalových rovin vede ke změně difrakčního úhlu. Vzorek se během analýzy otáčí okolo normály o úhel ψ . Při úhlu $\psi=0$ je vzdálenost atomových rovin d_0 . Pootočením vzorku okolo normály o úhel ψ dojde ke změně meziatomové vzdálenosti o $d\psi$. Vlivem vnitřního zbytkového napětí se změní meziatomová vzdálenost d , změní se difrakční úhel otočením vzorku o úhel ψ . V praxi se používá difrakční úhel vyšší než 120° . Pokud je v povrchu analyzovaného materiálu tlakové napětí, vzdálenost d se zmenší a úhel difrakce se zvýší v důsledku náklonu [23, 24].

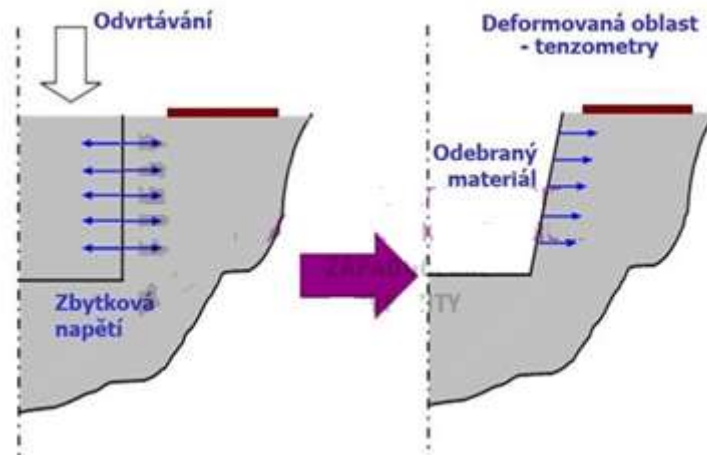


Obr. 4.7-2 Difrakce z rovin (které splňují Braggův zákon) [24]

4.7.2 Odvrtávací metoda „Hole drilling“

Tato metoda je nejčastěji používána pro získání hloubkové profilu zbytkového napětí. Metoda je založena na vyvrtání otvoru do povrchu materiálu. Tím dojde k uvolnění zbytkových napětí, které vyvolá deformaci v okolí otvoru. Deformace jsou měřeny ve třech osách. Zbytkové napětí se vyhodnocují pomocí tzv. kalibračních koeficientů. Otvor může být zhotoven pomocí konvenčních ale i nekonvenčních metod. Používá se vrtání čelní vřezou nebo speciálně tvarovanou frézou. Otvor může být zhotoven taky abrazivní tryskou, laserovým paprskem, nebo elektrojiskrově. Nejvhodnější metodou pro zhotovení otvoru je vysokorychlostní vrtání, u kterého dochází k nejmenšímu ovlivnění materiálu. Měření deformace se provádí nejčastěji tenzometrickými růžicemi. Existují ale také optické metody pro bezkontaktní měření na principech interferometrie. Naměřené deformace lze přepočítat na vzniklé napětí. Měření deformací popisovanou metodou lze do hloubky až 2 mm [24, 25].

Hlavní nevýhody této metody jsou částečné poškození povrchu analyzovaného vzorku či komponenty, snížená přesnost měření nehomogenního materiálu. Výhodou je pak rychlost provedení měření s možností hloubkové profilace zbytkového napětí [25].



Obr. 4.7-3 Princip měření deformace odvrtávací metodou [25]

4.8 Únavové poškození

Únavové poškození je velice závislé na stavu povrchu, a to jak na jakosti povrchu z pohledu drsnosti, přítomnosti vrubů, tak na velikosti a typu zbytkového napětí. Únava materiálu je charakterizována jako pomalu postupující dynamický proces cyklického namáhání, který zapříčiní plastickou deformaci s následnou nukleací a šířením trhliny až ke vzniku únavového lomu [30]. Celý proces únavového poškození se odehrává pod mezí pevnosti a mnohdy i pod mezí kluzu daného materiálu. Únavu materiálu či únavovou životnost lze z pohledů počtů cyklů do lomu rozdělit na nízkocyklovou do 10^5 cyklů a vysokocyklickou od 10^5 až do 10^7 cyklů či více dle toho, o jaký testovaný materiál se jedná, případně v jakém prostředí únavové zkoušky probíhají [30]. V případě zkoušek v korozním prostředí je velice časté, že testované materiály nemají mez únavy, která je pro ocel a litinu stanovena na 10^7 cyklů, u lehkých slitin pak na 10^8 cyklu [30].

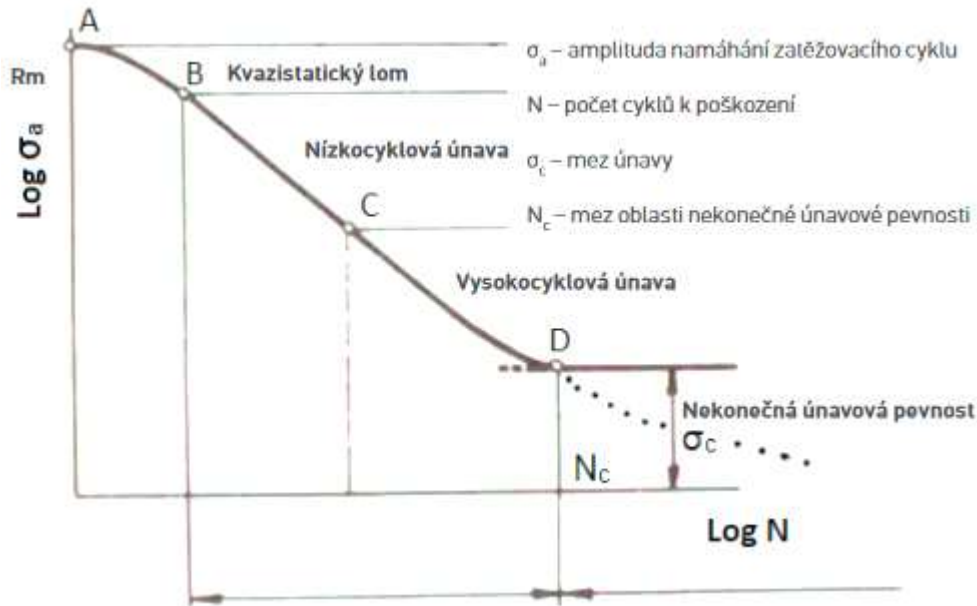
Zkoušky únavy se liší dle způsobu namáhání (tah, tlak, ohyb, krut i kombinované), zvoleném prostředí, teplotě, zatěžujícím poměrem, zatěžující frekvencí, způsobu řízení (silové či deformační), atd. Mezi nejčastější výstupy patří tzv. Wöhlerova křivka viz Obr. 4.8-1 [30].

Základní veličiny při únavových zkouškách

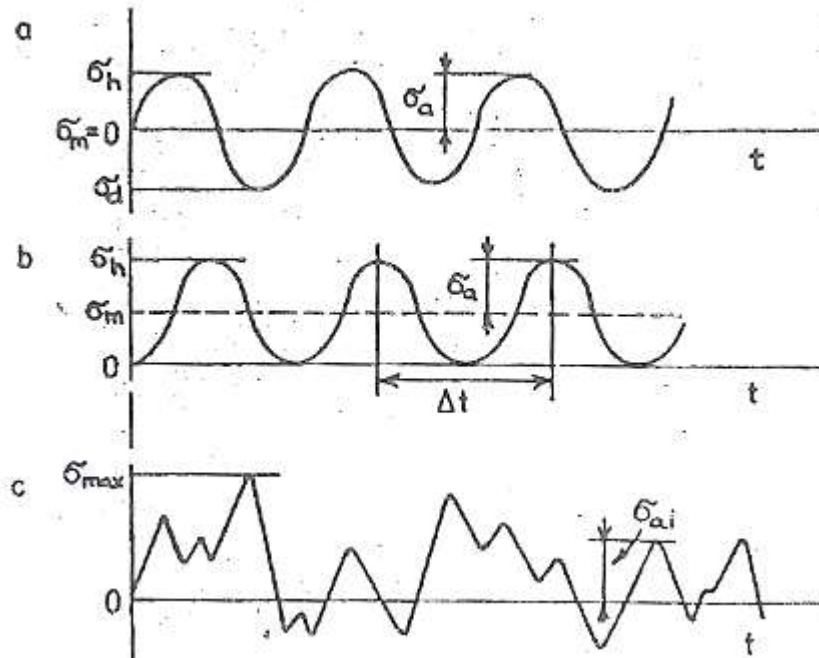
- N_f Počet cyklů do lomu
- σ_a Amplituda napětí
- σ_m Střední napětí
- σ_c Mez únavy
- R Součinitel asymetrie cyklu

Únavové zkoušky se provádí na specializovaných strojích, které umožňují dynamické zatěžování zkušebního tělesa. Dynamickým zatěžováním zkušebního tělesa dochází k lokální kumulaci vad v materiálu. V důsledku toho dochází k lokálnímu nárustu vnitřního napětí, které zapříčiní nukleaci mikroskopické trhliny, která se začne šířit a zmenšuje namáhaný průřez. V momentě, kdy průřez zkušebního tělesa není schopen přenést namáhání, dojde k rozlomení tělesa. Odkoušením dostatečného počtu zkušebních těles na různých hladinách namáhání lze vytvořit tzv. Wöhlerovu křivku, která graficky znázorňuje závislost amplitudy napětí na počtu cyklů, viz Obr. 4.8-1 [30].

Základní typy cyklického namáhání lze rozdělit na střídavý (souměrný) cyklus, míjivý cyklus a náhodné (stochastické) namáhání, střídavě nesouměrné. Časový průběh základních typů cyklického namáhání materiálů je uveden na Obr. 4.8-2. Při zkouškách únavy se hodnotí dvě základní veličiny: mez únavy a rychlost šíření trhlin [30, 49].



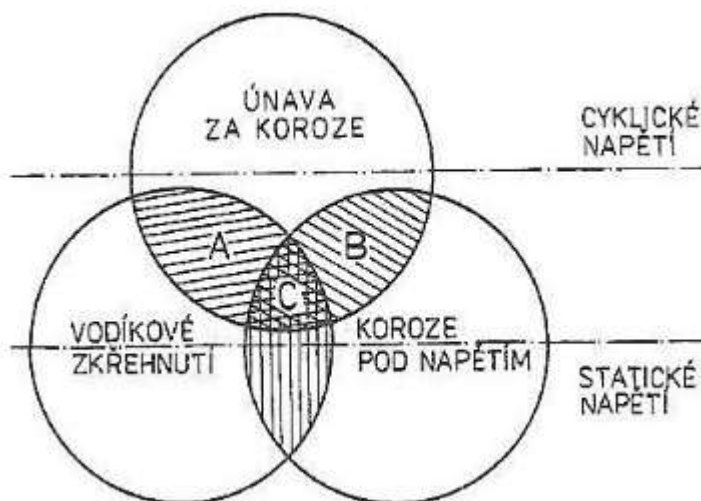
Obr. 4.8-1 Wöhlerova křivka s popisem [30]



Obr. 4.8-2 Časový průběh základních typů cyklického namáhání materiálů: a – střídavý (souměrný) cyklus, b – míjivý cyklus, c – náhodné (stochastické) namáhání a střídavě nesouměrné [49].

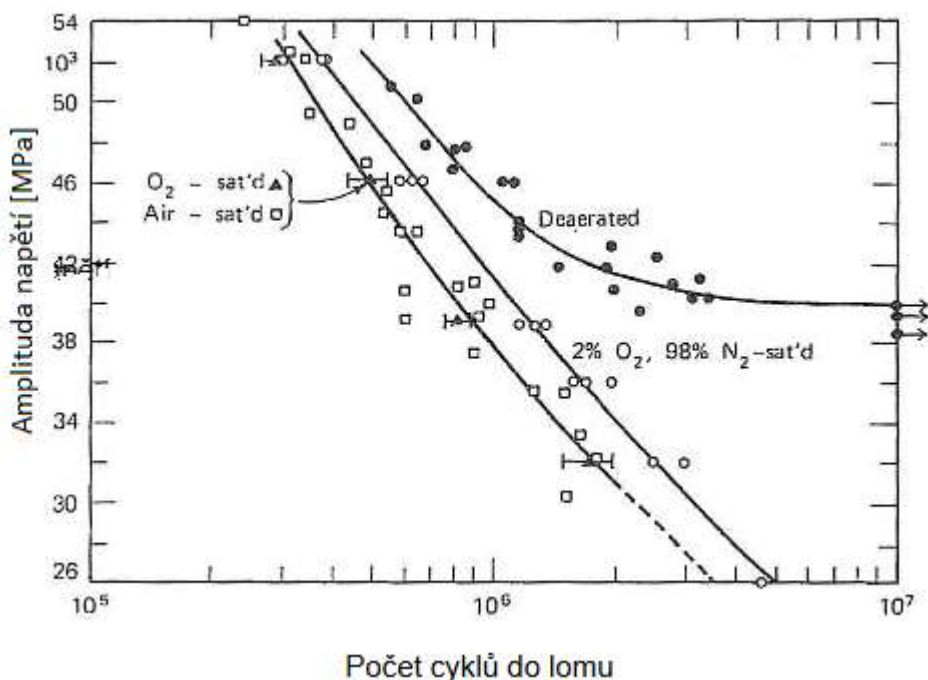
4.8.1 Vliv korozního prostředí na únavové poškození

Vlivem korozního prostředí oproti inertnímu prostředí dochází často ke zkrácení únavové životnosti a poklesu časové meze únavy. Ve velmi agresivních prostředích nelze časovou mez únavy ani stanovit, jelikož jí daný materiál v prostředí nemá v důsledku korozních mechanismů. Schéma vzájemného působení mechanického namáhání a korozního prostředí je uvedeno na Obr. 4.8-3 [49].



Obr. 4.8-3 Schematické znázornění mechanismů porušení v případech současného působení [49]

Příklad vlivu korozního prostředí na únavovou životnost oceli s 0,18 hm% C je uveden na Obr. 4.8-4. Na Obr. 4.8-4 lze pozorovat vliv množství rozpuštěného kyslíku ve vodném roztoku s chloridy na únavovou životnost [49].



Obr. 4.8-4 Vliv rozpuštěného kyslíku v roztoku 3 hm. % NaCl při 25 °C, na únavové chování oceli (0,18 hm. %) [49]

4.8.2 Fraktografické hodnocení lomových ploch

Fraktografický rozbor lomových ploch po únavových zkouškách může účinně přispět ke správné interpretaci výsledků při zkouškách VCÚ. Obecně lze říci, že únavové jsou trhliny iniciovány v místech s maximální koncentrací napětí. Ty představují vruby různého původu (konstrukční, technologické, strukturní, ...), skluzové pásy, vměstky, hranice zrn a subzrn. Součinitel intenzity napětí je v místě vrubu/defektu/heterogenity větší na povrchu tělesa než pod povrchem. Proto se všeobecně uvažuje, že únavové trhliny u zkušebních tyčí (z jednoho homogenního materiálu) jsou iniciovány na jejich povrchu. Již více než 50 let je známo, že se může uplatnit i mechanismus podpovrchové iniciace z vnitřních defektů. Tento jev je typický zejména pro vysokopevné kovové materiály, nicméně uplatnit se může i u řady dalších materiálů. Obecně platí, že při vysokých amplitudách napětí a nízkých počtech cyklů do lomu dochází k povrchové iniciaci (pro napětí s N_f do 10^4 z více ohnisek, pro napětí odpovídající $N_f \approx 10^6$ z jednoho ohniska) a při nízkých amplitudách napětí a vysokých počtech cyklů do lomu ($N_f \approx 10^8$) z vnitřních defektů. Se změnou mechanismu iniciace únavových trhlin jsou spojovány i změny ve tvaru S-N křivek [43].

V principu mohou nabývat tři tvarů:

- pokles a následující plató (konvenční mez únavy) spojené s povrchovou iniciací, po kterém následuje další pokles a plató (mez únavy pro podpovrchovou iniciaci) spojené s podpovrchovou iniciací
- pokles a následující plató (konvenční mez únavy) spojené s povrchovou iniciací, po kterém následuje další monotónní pokles spojený s podpovrchovou iniciací
- monotónní pokles pokud se uplatňují současně oba mechanismy [43].

Duplexní vzhled S-N křivek je spojován se způsobem zatěžování a jím určeného rozložení napětí ve vzorku. Vyskytuje se hlavně při zatěžování ohybem za rotace. Pro zatěžování tah–tlak je spíše typický monotónní pokles s možným výskytem zlomu v gigacyklové oblasti. Podpovrchová iniciace je spojená zejména s přítomností částic vměstků, případně i dalších defektů (pórů, ředin, ...). Rozhodující je při tom extrémní velikost vměstku a ne její střední hodnota. Uplatnění podpovrchové iniciace je výrazně ovlivněno vnitřními faktory (tepelným zpracováním, povrchovými úpravami, nanesenými povlaky) i vnějšími faktory (způsobem zatěžování, prostředím) [43, 44].

Povrchová iniciace trhliny

Vznik a šíření únavových trhlin je popisováno jako sled několika procesů, které zahrnují nukleaci mikrotrhlin, jejich krystalografické šíření (I. etapa, krátké trhliny) a nekystalografické šíření ve směru kolmém k působícímu cyklickému napětí (II. etapa, dlouhé trhliny) [33].

Vznik trhliny byl popsán několika modely:

- vznik intruzí a extruzí na povrchu opakovaným skluzem v jednom nebo ve dvou skluzových systémech (lokalizací cyklické plastické deformace v materiálu vznikají tzv. perzistentní skluzové pásy – oblasti s nízkou hustotou dislokací oddělené dislokačními stěnami s vysokou hustotou dislokací. Do těchto pásů se lokalizuje plastická deformace a v místech vyústění těchto pásů na povrch se vytvářejí tzv. perzistentní skluzové stopy reprezentované vyvýšeninami (extruze)

- a prohlubněmi (intruze), které se v průběhu zatěžování zvětšují. Stávají se koncentrátory napětí a posléze se v nich iniciují poruchy soudržnosti materiálu.)
- tvorbou intruzí přímo na hranicích zrn v důsledku vzájemného posunu sousedních zrn při intenzivní cyklické plastické deformaci v podpovrchové vrstvě tělesa
 - vznik křehkých trhlinek v kořeni koncentrátorů napětí
 - kondenzací vakancí
 - porušením koheze krystalu podél skluzové roviny akumulací dislokací

Povrchové mikrotrhliny vytvořené během nukleačního stádia jsou obvykle iniciovány a šíří se v jednom zrně polykrystalického materiálu v krystalografických (skluzových) rovinách s maximálním smykovým napětím a v průběhu dalšího cyklického zatěžování rostou podél těchto skluzových rovin do hloubky. Rozhodující je smyková složka napětí. Při přechodu do dalších zrn obvykle opět pokračuje v růstu podél význačných krystalografických rovin. Jen část mikrotrhlin však při dalším cyklickém zatěžování dále roste. Rostoucí trhlinky se však postupně vychylují ze skluzových rovin a stáčí se do směru kolmého k hlavnímu tahovému napětí a navzájem se spojují do jedné magistrální trhliny. Tím končí I. etapa [33, 44].

II. etapa nastává v momentě, kdy se na čele trhliny začíná vytvářet cyklická plastická zóna a trhlinka je schopna růstu i v podmínkách elastické deformace materiálu. Toto stádium růstu trhliny je řízeno normálovými napětími. Trhliny se šíří jen v malém objemu materiálu ve srovnání s celkovým objemem součásti. Pro šíření únavových trhlin jsou pak určující podmínky na špičce trhliny a cyklická plastická deformace je omezena na plastickou zónu před čelem trhliny [44].

Vymezení jednotlivých stádií není ostré a je věcí dohody. Délka a relativní význam jednotlivých stádií silně závisí na materiálu, geometrickém tvaru součásti, druhu zatěžování, přítomnosti vad a na okolním prostředí. Celkovou životnost součásti lze rozdělit na dvě etapy – čas potřebný ke vzniku trhliny a čas potřebný pro její šíření až do finálního lomu [33].

Podpovrchová iniciace únavových trhlin

Podpovrchová iniciace trhlin je problematika, která je studovaná a zdaleka není uzavřená oblast. Y. Murakami vypracoval parametrický model *varea* defektu, který byl aplikován na hodnocení povrchových konstrukčních vrubů, povrchové drsnosti, povrchových strukturních defektů a podpovrchových a vnitřních strukturních defektů [44, 45]. Význam vlivu malých defektů a nekovových vměstků na odolnost proti únavovému porušování a tímto vlivem vyvolaný značný rozptyl dat únavové životnosti je významným problémem vysokopevných ocelí. Vliv vměstků je analogický k vlivu vrubů/defektů, neboť napětí v jejich okolí jsou uvolňovaná vznikem trhlin na rozhraní částice – matrice, nebo uvnitř částic. Empirický model *varea* může být použitý na odhad odolnosti proti únavovému porušování na povrchových, podpovrchových i vnitřních defektech/vměstcích [33, 44].

Předpokládaná mez únavy σ_w je vyjádřena (empirickým) vztahem:

- pro povrchový defekt/vměstek

$$\sigma_c = 1,43 * (HV + 120) / (Varea)^{1/6} * ((1-R)/2)^\alpha \quad (6-4)$$

- pro vnitřní defekt/vměstek

$$\sigma_c = 1,56 \cdot (HV + 120) / (\sqrt{varea})^{1/6} \cdot ((1-R)/2)^\alpha \quad (6-5)$$

POZN. HV je tvrdost dle Vickerse, R je součinitel asymetrie cyklu a $\alpha = 0,226 \cdot HV \cdot 10^{-4}$ a varea je plocha průmětu maximálního defektu/vměstku do směru kolmého k největšímu tahovému napětí [44].

Na vznik únavové trhliny mohou mít vliv nehomogenity ve struktuře: precipitáty, vměstky a další mikrostrukturní heterogenity, postupné vytváření specifických mikrostrukturních podmínek. Velikost, tvar a rozložení zrn mohou svým působením urychlovat vznik trhliny tím, že mohou působit jako lokální koncentrátoři napětí. V závislosti na konkrétním uspořádání může být doba iniciace trhliny velmi krátká, nebo naopak velmi dlouhá, kdy se může trhlina vytvořit uvnitř materiálu, a ne na jeho povrchu. K vnitřnímu porušení materiálu může dojít, pokud jsou významně eliminovány povrchové defekty [42, 43].

Charakteristický vzhled lomových ploch únavových trhlin

Typický vzhled lomové plochy při dlouhodobém proměnlivém zatěžování znamená, že v okolí lomové plochy není zjištělná trvalá makroplastická deformace. Každá únavová lomová plocha ocelového dílu, u něhož došlo k úplnému rozlomení, obsahuje v zásadě tři hlavní oblasti, které lze většinou rozlišit na makrofraktografické úrovni [43].

- Oblast počátku vzniku trhliny/trhlin – ohnisko. Obvykle se nachází na povrchu součásti nebo na vnitřní nehomogenitě v místě koncentrace napětí.
- Oblast, v níž proběhl pozvolný růst trhliny. Ta se dělí dále na úsek postupného rozvoje trhliny, zaujímající převážnou část oblasti pozvolného růstu a část urychleného rozvoje ležícím před oblastí konečného dolomení.
- Oblast konečného náhlého porušení (dolomení), ke kterému dojde v okamžiku, kdy únavovou trhlinou zeslabený účinný průřez součásti není schopen přenášet působící napětí. V závislosti na stavu materiálu, způsobu namáhání a prostředí k němu může dojít houževnatým i křehkým lomem [43].

Vzhled lomové plochy trhliny (v II. etapě šíření) může odrážet to, že šíření trhlin je spojitý opakující proces a velikost trhliny se zvětšuje při každém zátěžovém cyklu. Na lomové ploše lze proto často pozorovat pravidelně se opakující prohlubně a vyvýšeniny nazývané striace. Jejich vznik vysvětluje Lairdův model únavového porušování, který byl později upravován. Je založen na předpokladu, že šíření únavové trhliny je obecně transkrystalické a nekystalografické a že k postupu čela únavové trhliny dochází u tvárného materiálu v každém zátěžovém cyklu. Při systematizaci mikrofraktografických únavových znaků jsou však rozlišovány transkrystalické tvárné striace (nejběžnější varianta), krystalograficky orientované striace, křehké únavové striace a interkrystalické únavové striace. Šíření únavových trhlin je komplexní proces ovlivněný řadou faktorů. Uplatňuje se tak při něm většinou působení několika lomových mikromechanismů [43, 44].

- kombinace únavových striací a transkrystalického štěpení/kvazištěpení (typické pro materiály s vysokou pevností a nízkou tvárností a materiály s nízkou krystalografickou symetrií);
- kombinace únavových striací a transkrystalického tvárného porušení (střídání striací a oblastí jamek nízkoenergetické tvárné separace, vyskytuje se u tvárných

materiálů s jemnými částicemi sekundárních fází zatěžovaných při vysokých amplitudách cyklické plastické deformace);

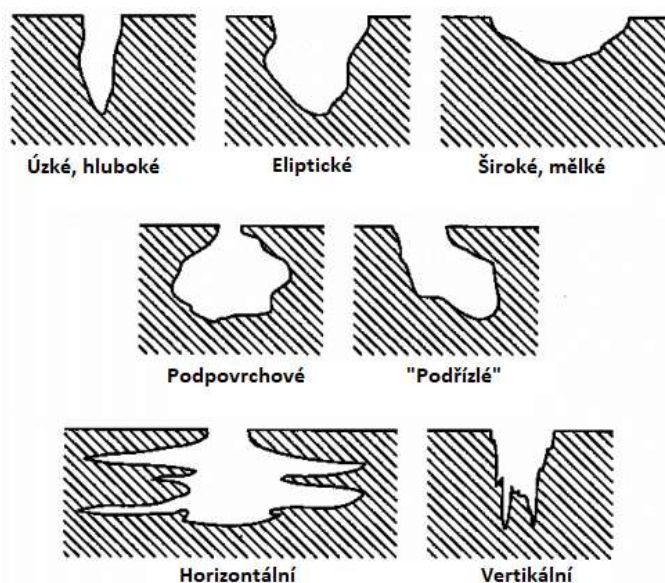
- kombinace únavových striací a interkrystalického štěpení (přítomnost faset interkrystalického porušení po hranicích bývalých či stávajících zrn, podporuje je vysoká složka statického zatížení, korozní prostředí, zkřehnutí hranic zrn v důsledku segregací, precipitace či působení vodíku);
- kombinace únavových striací a interkrystalického tvárného porušení.

4.9 Hodnocení únavové životnosti lopatkových ocelí s uměle vyrobenými důlky

Únavové poškození lopatek parních turbín vycházející z korozních důlků patří mezi kritické problémy, které se na parních turbínách fosilních elektráren objevují. Výzkum v oblasti predikce životnosti lopatek parních turbín probíhá již řadu let, přičemž se neustále přichází s novými metodami predikce životnosti v závislosti na namáhání a korozním poškození lopatek. Největší problém s důlkovou korozí bývá v nízkotlaké části parní turbíny, kde dochází ke kondenzaci páry. Z předchozích výzkumů a měření vyplývá [41], že korozní důlky nevznikají při provozu turbíny, ale při jejich odstávkách a najíždění, kdy čistota páry není stabilní. Po najetí na standartní provoz turbíny, pára potažmo kondenzát obsahuje minimální množství kyslíku a chloridů a nevytváří agresivní korozní prostředí pro vznik a růst korozních důlků [55].

Vzniklé korozní důlky působí na povrchu lopatky jako koncentrátor napětí, který v nejméně dynamicky namáhaných oblastech může iniciovat vznik únavové trhliny. Pokud by se vzniklý korozní bod vnímal pouze jako vrub, tak lze pomocí lineární lomové mechaniky spočítat kritickou velikost důlků a stanovit faktor intenzity napětí pro šíření trhliny. Tyto výpočty a měření se již provádí několik let a byly prezentovány v mnoha článcích [51, 52, 53].

Pro přesnější stanovení únavových charakteristik chování lopatek poškozených bodovou korozí bylo nutné vytvořit nový způsob testování v laboratorních korozních celách. Jedním z nejméně komplikovaným jevem v predikci životnosti poškozených lopatek je různorodost tvarů korozních důlků, které se na lopatkách tvoří viz Obr. 4.9-1. Každý tvar důlků má různou kritičnost z pohledu koncentrátoru napětí pro vznik a šíření trhliny [55].



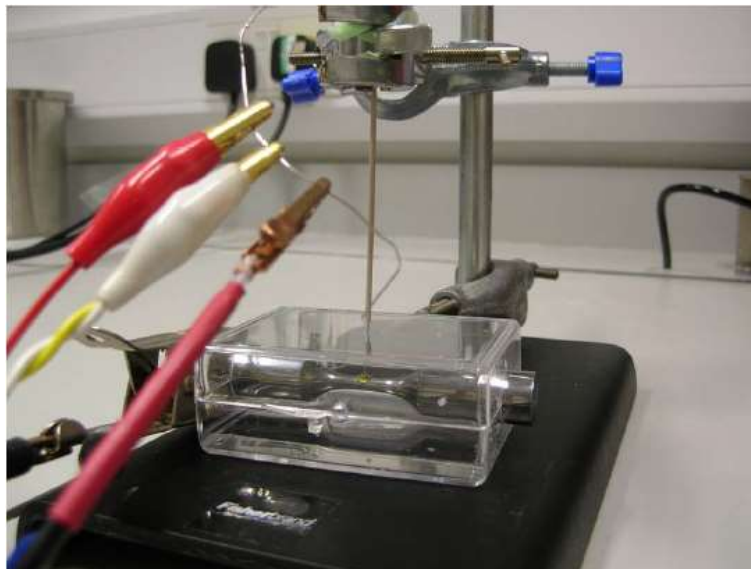
Obr. 4.9-1 Základní typy korozních důlků [54]

Výroba umělých vrubů pomocí korozních procesů je možná, avšak je velký problém s konzistentním tvarem a rozměry důlků. Proto se pro únavové zkoušky v korozním prostředí často vytvářejí uměle vyrobené důlky obráběním, vyjiskřováním, laserováním, atd. Oproti chemickým procesům je tvar a rozměr vyrobených důlků srovnatelný a umělé důlky mají shodný vrubový účinek.

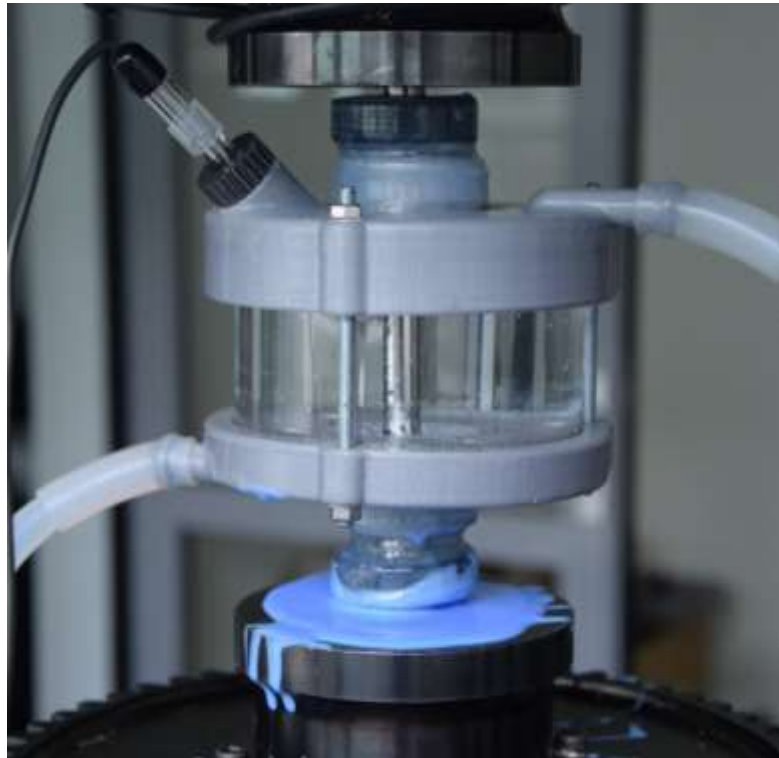
Zkoušky pro hodnocení životnosti lopatek se většinou provádějí na únavových strojích s různou frekvencí zatěžování. Před samotnou zkouškou je důležité si nadefinovat parametry testu:

- Typ zkušebního tělesa
- Velikost a tvar korozního důlku
- Zatěžující parametry
- Ukončovací parametry testu
- Typ a koncentrace korozního prostředí
- Rychlost proudění
- Zkušební teplota
- Množství kyslíku, hodnota PH, atd.

Na Obr. 4.9-2 je zachycena elektrochemická výroba korozního bodu dle metodiky EPRI [55] pro zkoušky vysokocyklické únavy. Na Obr. 4.9-3 je korozní cela se zkušebním tělesem s uměle vyrobeným korozním bodem s elektrodou pro záznam elektrochemického šumu pro detekci trhliny v laboratoři Centra výzkumu Řež [54, 55].



Obr. 4.9-2 Výroba korozního bodu elektrochemickou metodou [55]

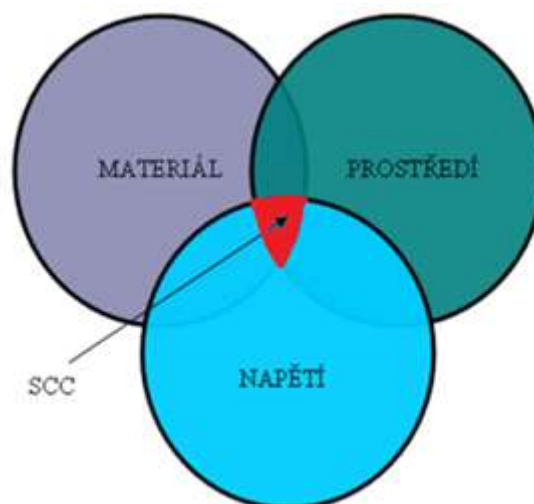


Obr. 4.9-3 Korozní cela pro měření vysokocyklické únavy na tělesech s uměle vyrobeným korozním bodem

4.10 Korozní praskání

Korozní praskání patří mezi nejvíce problematický degradační mechanismus kovových slitin v technické praxi, jelikož k němu dochází lokálně a špatně se detekuje v počátcích. Korozní praskání je definováno jako druh korozního napadení, které je vždy doprovázeno tahovým napětím v materiálu. Pro vznik korozního praskání musí být splněny tři základní podmínky, kterými jsou: [45]

- Agresivní korozní prostředí pro daný typ materiálu
- Citlivost kovového materiálu ke korozi
- Tahové napětí na povrchu



Obr. 4.10-1 Mechanismus korozního praskání [32]

Stádia korozního praskání lze rozdělit do jednotlivých etap. V první etapě dochází k nukleaci korozní mikrotrhliny na volném povrchu materiálu, poté následuje subkritický růst mikrotrhliny až po subkritický růst makrotrhliny [45].

Mechanismus a rychlost korozního praskání je silně ovlivněn agresivitou korozního prostředí, teplotou a faktorem intenzity napětí. Při nízkých hodnotách faktoru intenzity napětí převládá interkrystalické korozní praskání, při vyšších hodnotách faktoru intenzity napětí se pak uplatňuje transkrystalické štěpení a při nejvyšších hodnotách faktoru intenzity napětí se trhlinka šíří tvárným mechanismem [45].

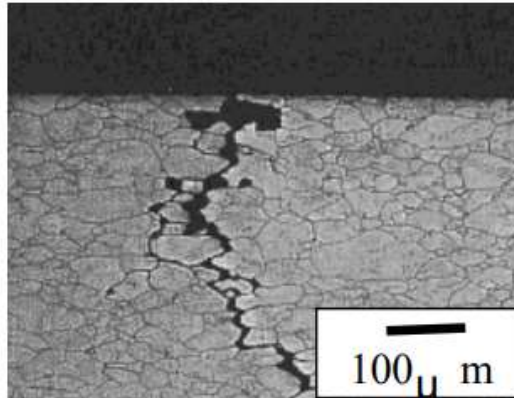
Mechanismus korozního praskání se obecně dá vysvětlit aktivním rozpouštěním na čele trhliny, která zároveň působí jako koncentrátor napětí viz Obr. 4.10-2.



Obr. 4.10-2 Mechanismus korozního praskání [45]

Obecně lze říct, že citlivost kovů ke koroznímu praskání je závislá na homogenitě struktury, kdy jednofázové slitiny např. čisté kovy vykazují menší náchylnost ke koroznímu praskání. Dalším aspektem, které ovlivňují náchylnost ke koroznímu praskání jsou mechanické vlastnosti, zejména pak pevnost v tahu. Kovy a jejich slitiny s vysokou pevností v tahu jsou obvykle náchylnější ke koroznímu praskání. Korozní trhliny se prioritně šíří ve směru kolmém k tahovému napětí [45].

Z pohledu vlivu oxidační schopnosti materiálu jsou nebezpečné hraniční potenciálové oblasti pasivity (za pasivačním potenciálem a kolem průrazového potenciálu) – pasivní vrstva je zde nestabilní. Každá nerovnost na povrchu materiálu může způsobit koncentraci tahového namáhání. Proto často souvisí vznik trhliny s místem štěrbinové nebo bodové koroze, kdy štěrbinová či důlek jsou v roli koncentrátoru napětí a urychlují vznik trhliny. V trhlince vzniká rovněž agresivnější prostředí ve formě zakoncetrování korozního prostředí [45]. Typický příklad interkrystalické korozní trhliny v austenitické struktuře oceli AISI 304 je na Obr. 4.10-3 [22].



Obr. 4.10-3 Korozní praskání oceli AISI 304 [22]

4.11 Aplikace LSP na materiály v energetickém sektoru ČR

Možnosti aplikace LSP, respektive řízeného vnášení tlakového napětí do povrchu materiálu, je široká. Před samotným použitím technologie LSP je důležité vždy odhalit jaký konkrétní problém má daný materiál či strojní součást. Technologií LSP lze docílit redistribucí zbytkového napětí zlepšení široké škály užitečných vlastností materiálů. Mezi nejvýznamnější vlastnosti, které se technologií LSP vylepšují, patří únavová pevnost, vznik a rychlost šíření trhliny, potlačení korozního praskání, zlepšení otěruvzdorných vlastností, zvýšení povrchové tvrdosti, potlačení vrubových účinků z výroby strojních součástí, modifikace mikrostruktury, atd. Všechny vyjmenované vlastnosti a parametry technických materiálů mají velký význam při konstruování strojních součástí používaných v českém energetickém sektoru.

Únavová pevnost patří mezi základní mechanické vlastnosti materiálů a je přítomná v nízkocyklové nebo ve vysokocyklové podobě téměř v každé strojní součásti v energetice [30]. Mezi odvětví, kde vysokocyklová únava dominuje jako hlavní zatěžující parametr, patří oblast turbínářství, a to především lopatky turbín. Mezi největší problémy, které se vyskytují s provozováním lopatek parních turbín, patří vznik korozních bodů, které vytváří v lopatce koncentrátor napětí, který může způsobit oslabení a vznik únavové trhliny, která může mít za následek havárii celé turbíny a odstavení celého bloku elektrárny. Problematika vzniku korozních bodů a jejich předcházení je poměrně dlouho studována a popsána např. v databázi Electric Power Research Institute (EPRI) [32]. V současné době převládá názor, že za provozu korozní důlky na lopatkách nevznikají ani nerostou. K této teorii se přiklání i výzkumné zprávy EPRI [32]. Proto lze na korozní důlky pohlížet jako na vrub. LSP apriorně svým principem nezlepšuje korozní odolnost materiálu proti bodové korozi, ale dokáže posílit kritická místa, kde se předpokládá vznik a šíření trhliny.

Korozní praskání patří mezi nejvíce problematické chování materiálů v jaderné energetice, kde způsobuje problémy v primárních, sekundárních i terciárních okruzích vodních reaktorů. Mezi nejvíce citlivé oceli ke koroznímu praskání patří austenitické oceli s hrubozrnnou strukturou a nižšími obsahy chromu a niklu. Jednou z takových ocelí je i austenitická ocel GOST 08CH18N10T, která patří mezi hojně používané oceli v reaktorech typu VVER. Z této oceli se v jaderné energetice vyrábí celá škála komponent od potrubí chladiva po další pomocné zdroje JE.

5 Geneze výzkumné práce

Výzkumné práce v oblasti technologie LSP probíhají ve společnosti Centrum výzkumu Řež a na Západočeské univerzitě v Plzni ve spolupráci s Fyzikálním ústavem AV ČR - HiLASE (Nové lasery pro průmysl a výzkum) od roku 2016. Centrum HiLASE disponuje jako jediné v ČR experimentální stanicí LSP s laserovým systémem L2 o výkonu 100 J, 10 Hz, 1030 nm, variabilním tvarem a délkou pulsu (2-10 ns), velikostí svazku 75x75 mm. Tento laser je světovým unikátem v oblasti výkonu u vysokofrekvenčních laserů (dosahuje nejvyššího světového výkonu 100 J v oblasti nanosekundových laserů).

V průběhu 5 let byla provedena řada experimentů pro ověření mechanických a fyzikálních vlastností na materiálech Böhler T552, Böhler T671, GOST 14Ch17N2 a GOST 08Ch18N10T. Autor disertační práce absolvoval v roce 2018 měsíční studijní stáž na technické Univerzitě v Cincinnati v laboratoři „Center for Laser Shock Processing for Advanced Materials and Devices“ u profesora Seetha Ramaiah Mannava, který patří mezi uznávané odborníky a průkopníky technologie LSP ve světě. V rámci studijní stáže byly provedeny experimenty LSP na ocelích Böhler T552 a GOST 08Ch18N10T za účelem zvýšení únavové životnosti.

Výsledky z provedených experimentů a analýz byly zpracovány do podoby tří recenzovaných článků. Dále byla část výsledků použita v rámci experimentálního programu diplomové práce studenta Bc. Petra Papeže. V roce 2019 byla navázána spolupráce CVŘ s.r.o. se Škoda JS a.s. a ČEZ a.s. v oblasti LSP se zaměřením problematiky korozního praskání komponent v jaderném průmyslu, konkrétně problematiku SCC heterogenních svarů a oběžných kol cirkulačních čerpadel. Na základě této spolupráce byly v roce 2019 podány 2 projekty. Dvě projektové žádosti do výzev Technologické Agentury České republiky (TAČR): ZÉTA „Vliv technologie Laser Shock Peening na citlivosti materiálů vystavených korozní degradaci“ a THÉTA „Laserové technologie pro zvyšování užitečných vlastností komponent jaderných zařízení GIII a GIV“.

V akademickém roce 2019/2020 byla obhájena diplomová práce Ing. Martina Skopce na téma „Zpevnování kovových materiálů metodou Laser Shock Peening (LSP)“, kde disertant figuroval jako konzultant a zodpovídal za rešeršní a experimentální část ve společnosti CVŘ. Výstupy experimentálních zkoušek na téma LSP byly publikovány ve dvou recenzovaných článcích. V akademickém roce 2020/2021 byla řešena diplomová práce Ing. Jany Závitkovské na téma „Vliv Laser Shock Peening (LSP) na korozní odolnost ušlechtilých ocelí“, kde disertant zastával roli konzultanta a zajišťoval experimentální činnost v CVŘ a Hilase. Na základě příznivých experimentálních výsledků v oblasti LSP se v roce 2021 navázala spolupráce s ČEZ, a.s. ve formě VaV projektu na téma Prodloužení životnosti heterogenních svarových spojů na sekundárním okruhu jaderné elektrárny. V návaznosti na příznivé výsledky testů VCÚ byla podaná patentová přihláška „A method for extending fatigue life of a turbine blade affected by pitting and product thereof“ - H19004, kde autor disertační práce je 25% autorem.

6 Popis a zdůvodnění experimentálního programu

Experimentální program disertační práce byl volen pro ověření vlivu LSP na základní materiálové vlastnosti vybraných materiálů používaných především v českém energetickém sektoru. Volba experimentů byla konzultována s průmyslovými a výzkumnými partnery – Centrum výzkumu Řež s.r.o., Západočeská univerzita Katedra materiálů a strojírenské metalurgie, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i -HiLASE, ČEZ a.s., Škoda JS a.s., Škoda power a.s. Na základě konzultací s partnery byly vybrány celkem 2 typy materiálů k testování. Vybrané materiály se hojně používají v klasické i jaderné energetice pro výrobu strojních součástí, které jsou vystaveny zejména únavovému zatížení a koroznímu poškozování.

Prvním materiálem je austenitická ocel GOST 08CH18N10T, která je hojně používána v české jaderné energetice na rektorech typu VVER (vodo-vodní energetický reaktor). Materiál GOST 08CH18N10T se používá pro výrobu komponent primárního a sekundárního okruhu (cirkulační čerpadla, potrubí, příruby atd.) Komponenty vyrobené z této oceli jsou nejvíce namáhány mechanicky a korozně. Mezi nejčastější příčiny poškození těchto komponent patří únava a korozní praskání (SCC). Úkolem experimentální části je prokázat vliv LSP na základní mechanické vlastnosti a odolnost proti koroznímu praskání, které se u tohoto materiálu vyskytuje např. na heterogenních svarech a cirkulačních čerpadlech.

Druhým materiálem je ocel Böhler T552, která se hojně používá v energetickém sektoru na výrobu parních turbín pro fosilní elektrárny. U lopatek parních turbín dominuje zejména dynamické namáhání způsobené vibracemi celé turbíny. Proto je důležité lopatky parních turbín dimenzovat na únavové namáhání.

Pro získání základních dat se nejčastěji provádějí únavové zkoušky v oblasti vysoko cyklické únavy, a to jak na vzduchu, tak v prostředí simulujícím provozní prostředí přehřáté a mokré páry. U nových lopatek, které jsou správně konstruované a dimenzované, nebývají v počátcích problémy, jelikož lopatky nemají kritické vruby, které způsobují koncentrování napětí. V provozu se však velice často objevuje bodová koroze na lopatkách parních turbín, která dle metodiky EPRI [32] má za následek především vznik významného koncentrátoru napětí, ze kterého se může začít šířit únavová trhлина, která většinou způsobí destrukci celé lopatky či turbíny. Tento způsob poškození turbíny patří mezi nejčastější a nejzávažnější a způsobuje velké ekonomické škody provozovateli. Proto je snaha turbíny a lopatky turbín periodicky kontrolovat a preventivně měnit poškozené řady lopatek. V současné době se parní turbíny kontrolují 3D skenováním, které má za úkol odhalit nejkritičtější poškození lopatky a přes výpočtové modely stanovit rizikovost dalšího provozování turbíny. V případě odhalení kritického poškození musí dojít k řízené odstávce turbíny. V současné době neexistuje v ČR jiný způsob opravy než odstávka turbogenerátoru a výměna celého rotoru turbíny. Tato oprava patří mezi nejdražší opravy na fosilních elektrárnách. Proto je velká motivace opravit turbínu bez nutnosti vyjmutí z turbínové skříně a převozu rotoru turbíny k výměně lopatek.

6.1 Experimentální materiál

6.1.1 Základní vlastnosti materiálu GOST 08CH18N10T

Materiál GOST 08CH18N10T je chrom-niklová austenitická žáruvzdorná ocel stabilizovaná titanem. Ekvivalentem této oceli jsou AISI 321 dle ASTM/ASME, X6CrNiTi18-10 (Wr.N 1.4541)

dle normy EN a 41 7247. Stabilizací oceli titanem dochází k výraznému potlačení precipitací karbidů chromu po hranicích zrn a tím ke zlepšení odolnosti proti teplotě a mezikrystalické korozi. Ocel používaná pro jadernou energetiku musí mít maximální čistotu dle předpisu EN 10204/3.1. Základní chemické složení garantované výrobcem je uvedeno v Tab. 6-1, základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 6-2.

Pro účely mechanických a korozních zkoušek byly všechny vzorky vyrobeny z akreditovaného materiálu dodaného Škodou JS a.s. s číslem tavby 474322. Zkušební protokol materiálu je uveden v příloze 11.2.

Tab. 6-1 Chemické složení oceli GOST 08CH18N10T

| Materiál | Fe [hm. %] | C [hm. %] | Mn [hm. %] | Si [hm. %] | P [hm. %] | S [hm. %] | Cr [hm. %] | Ni [hm. %] | Cu [hm. %] | Mo [hm. %] | Ti [hm. %] |
|-----------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| GOST 08CH18N10T | - | 0,05 | 1,68 | 0,57 | 0,02 | 0,001 | 17,5 | 9,9 | 0,06 | 0,06 | 0,47 |

Tab. 6-2 Základní mechanické vlastnosti oceli GOST 08CH18N10T

| Materiál | Teplota [C°] | Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost – A50 [%] | Kontrakce [%] | HB |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------|-----|
| GOST 08CH18N10T | 30 | 248 | 565 | 54,5 | 76 | 140 |
| | 350 | 213 | 425 | 31 | 69 | |

6.1.2 Základní vlastnosti materiálu Böhler T552

Ocel Böhler T552 je vysoce legovaná chrom-nikl-mangan-vanadová X12CrNiMoV12-3 neboli Wr.N 1.4938 nebo Wr.N 1.4939. Tato ocel od společnost Böhler je určena pro výrobu oběžných lopatek parních turbín s žárupevnými vlastnostmi a odolností proti dynamickému zatěžování. Ocel se dodává ve válcovaném nebo kovaném stavu. Základní chemické složení a mechanické hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6-3 a Tab. 6-4.

Pro účely mechanických zkoušek byla použita tavba oceli Böhler T552 T95803 od výrobce parních lopatek Škoda power a.s. Materiál dané tavby byl podroben hodnocení mikročistoty dle ASTM E 45 – metoda A a DIN 5062 ve VZÚ Plzeň s.r.o. v technické zprávě „VYZ- Z- 2/15/092“ [46]. Mikročistota dle uvedených norem vyhověla. Bylo zde však pozorováno hraniční množství a velikosti globulárních vměstků.

Tab. 6-3 Chemické složení oceli Böhler T552

| Materiál | Fe [hm. %] | C [hm. %] | Si [hm. %] | Mn [hm. %] | Cr [hm. %] | Mo [hm. %] | Ni [hm. %] | V [hm. %] | N [hm. %] |
|-------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Böhler T552 | - | 0,12 | 0,20 | 0,80 | 11,70 | 1,70 | 2,70 | 0,30 | 0,04 |

Tab. 6-4 Základní mechanické vlastnosti oceli Böhler T552

| Materiál | Teplota [°C] | Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost – A50 [%] | Kontrakce [%] |
|-------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Böhler T552 | 30 | 760 | 1100 | 14 | 40 |

6.2 Použitá technologie LSP pro modifikaci povrchu

Pro zpevnění povrchu technologií LSP bylo použito zařízení L2- BIVIOJ na pracovišti FZÚ v Dolních Břežanech. Jedná se o výkonný diodově čerpaný pevnolátkový pulsní laser s parametry: vlnová délka 1030 nm, délka pulsu 10 ns, maximální energie v pulsu 100 J s frekvencí 10 Hz. Polohování vzorků bylo zajištěno 6-osým robotickým ramenem Fanuc M-20iA / 20M [36]. Ukázka pracoviště LSP v Dolních Břežanech je uvedena na Obr. 6.2-1. Druhým použitým typem LSP stanice bylo zařízení s pulsním laserem Continuum (vlnová délka 1030 nm, délka pulsu 10 ns, maximální energie v pulsu 5 J s frekvencí 10 Hz) na technické Univerzitě v Cincinnati v laboratoři „Center for Laser Shock Processing for Advanced Materials and Devices“ u profesora Seetha Ramaiah Mannava, viz Obr. 6.2-2. Pro jednotlivé experimenty byl povrch vzorků zpevněn dle níže uvedených parametrů.



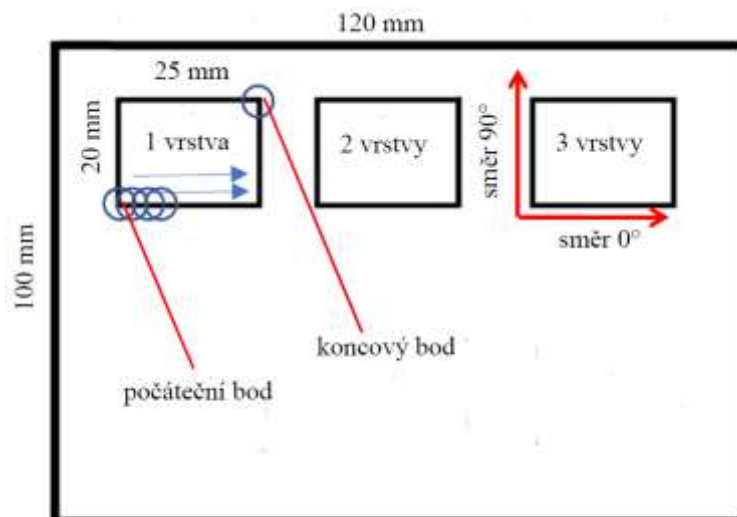
Obr. 6.2-1 LSP laboratoř FZÚ HiLase [36]



Obr. 6.2-2 LSP laboratoř „Center for Laser Shock Processing for Advanced Materials and Devices“

6.2.1 LSP modifikace povrchu pro měření zbytkového napětí a mikrotvrdosti

Pro analýzu zbytkového napětí a mikrotvrdosti na testovaných materiálech bylo použito následující nastavení LSP procesu viz Obr. 6.2-3 a Tab. 6-5. Na každé destičce byly ovlivněny 3 čtvercové oblasti o rozměrech 20x25 mm. Přičemž každá oblast byla zpevněna různým nastavením LSP procesu, viz Tab. 6-5, resp. různými počty vrstev (1, 2, 3). Povrch byl zpevněn laserem Continuumm na technické Univerzitě v Cincinnati v laboratoři.



Obr. 6.2-3 Schéma testované destičky s LSP modifikací [24]

Tab. 6-5 Parametry LSP procesu

| Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Ochranná ablační vrstva | Plošná hustota pulsů [1/cm ²] | Překrytí pulsů v řadě [%] | Překrytí řad [%] | Doba pulsu [ns] |
|-------------------|-------------------|---|-------------------------|---|---------------------------|------------------|-----------------|
| 3 | 2 | 3,2 | Vinylová páska | 64 | 52,8 | 77,8 | 30 |

6.2.2 LSP modifikace povrchu pro tahové zkoušky

Parametry LSP zpracování zkušebních těles jsou uvedeny v Tab. 6-6. Parametry byly zvoleny na základě možnosti laseru a LSP stanice na pracovišti Hilase v Dolních Břežanech a zkušek měření zbytkového napětí. Zkušební tělesa byla zpevněna z obou stran.

Tab. 6-6 Parametry LSP procesu pro tahové zkoušky

| Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Ochranná ablační vrstva | Počet sekvencí | Překrytí pulsů v řadě [%] | Překrytí řad [%] | Doba pulsu [ns] |
|-------------------|-------------------|---|-------------------------|----------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| 2,5 | 2 | 6,25 | Vinylová páska | 4 | 40 | 50 | 10 |

6.2.3 LSP modifikace povrchu pro únavové zkoušky v tříbodovém ohybu

Ocelové desky z materiálu Böehler T552 byly zpevněny dle parametrů uvedených v Tab. 6-7. a GOST 08CH18N10T byly zpevněny dle parametrů uvedených v Tab. 6-8. Fotografie povrchu zpevněných materiálů je na Obr. 6.2-4. Pro tento test se použila široká škála nastavení

LSP procesu, která měla prokázat citlivost materiálu na únavové namáhání v závislosti na nastavení LSP procesu. Zpevňování povrchu bylo voleno strategií tzv. po jednotlivých řádcích od spodu směrem nahoru. Materiály byly zpracovány LSP stanicí na pracovišti Hilase v Dolních Břežanech.

Tab. 6-7 LSP parametry pro zpevnění desek z materiálu Böhler T552

| Označení série vzorků | Materiál | Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Počet sekvencí | Páska | Plošná hustota pulsu [1/cm ²] | Překrytí pulsů v řadě [%] | Celkové překrytí řad [%] |
|-----------------------|----------|-------------------|-------------------|---|----------------|-------|---|---------------------------|--------------------------|
| dvě sekvence 14 | T552 | 5,2 | 2,65 | 7,4 | 2 | Vinyl | 25 | 24,5 | 43 |
| 11 bez pásky | T552 | 5,2 | 2,65 | 7,4 | - | Ne | 64 | 52,8 | 77,8 |
| 13 | T552 | 5,2 | 2,65 | 7,4 | 1 | Vinyl | 25 | 24,5 | 43 |
| 2_13 bez pásky | T552 | 3,75 | 1 | 37,5 | - | Ne | 156,3 | 20 | 36 |
| dvě sekvence 12 | T552 | 3,75 | 2,5 | 6,0 | 2 | Vinyl | 25 | 20 | 36 |
| 2_11 | T552 | 3,75 | 2 | 9,4 | 1 | Vinyl | 30,9 | 10 | 19 |
| 3_14 bez pásky | T552 | 2,8 | 1 | 28,0 | 1 | Ne | 156,3 | 20 | 36 |

Tab. 6-8 LSP parametry pro zpevnění desek z materiálu GOST 08CH18N10T

| Označení série vzorků | Materiál | Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Počet sekvencí | Páska | Plošná hustota pulsu [1/cm ²] | Překrytí pulsů v řadě [%] | Celkové překrytí [%] |
|-----------------------|------------|-------------------|-------------------|---|----------------|-------|---|---------------------------|----------------------|
| dvě sekvence 8 | 08CH18N10T | 5,2 | 2,65 | 7,4 | 2 | Vinyl | 64 | 52,8 | 77,8 |
| 6 bez pásky | 08CH18N10T | 5,2 | 2,65 | 7,4 | - | No | 64 | 52,8 | 77,8 |
| 9 | 08CH18N10T | 5,2 | 4,15 | 3,0 | 1 | Vinyl | 28,5 | 54,9 | 79,6 |
| 7 | 08CH18N10T | 5,2 | 2,65 | 7,4 | 1 | Vinyl | 28,5 | 29,3 | 50 |
| 2_6 | 08CH18N10T | 3,75 | 3 | 4,2 | 1 | Vinyl | 22,7 | 30 | 51 |
| 2_9 bez pásky | 08CH18N10T | 3,75 | 2 | 9,4 | - | No | 69,4 | 40 | 64 |
| 3_6 bez pásky | 08CH18N10T | 2,8 | 1 | 28,0 | - | No | 156,3 | 20 | 36 |



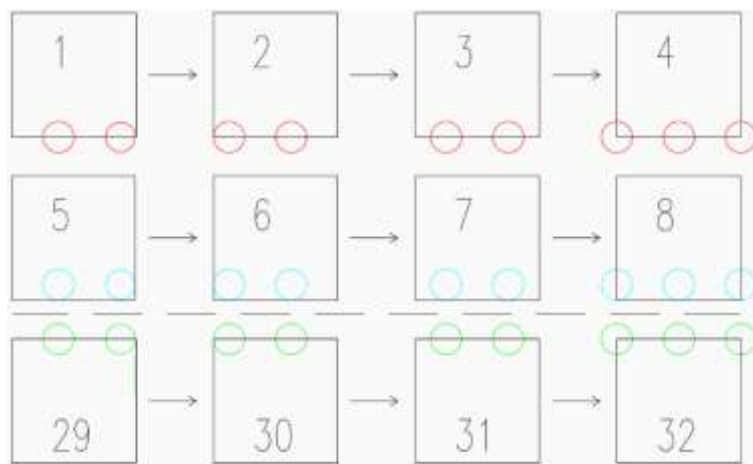
Obr. 6.2-4 Zpevněné desky pro výrobu zkušebních těles

6.2.4 LSP modifikace povrchu dle numerické simulace pro únavové zkoušky v tříbodovém ohybu

Cílem zpevňování bylo distribuovat maximální tlakové napětí do oblasti vrubu zkušebního tělesa. Pro tento účel byla zvolena strategie „střelby“ dle následujícího schématu viz Obr. 6.2-5. Strategie vychází z numerických simulací z literárního zdroje [37]. Hlavním principem strategie je směřovat tlakové napětí do středu jednotlivých řádků, proto jsou jednotlivé „výstřely“ umístěny ne za sebou, ale na přeskáčku, viz Obr. 6.2-5. Materiál byl zpracován LSP stanicí na pracovišti Hilase v Dolních Břežanech, dle parametrů viz Tab. 6-9.

Tab. 6-9 Parametry LSP procesu

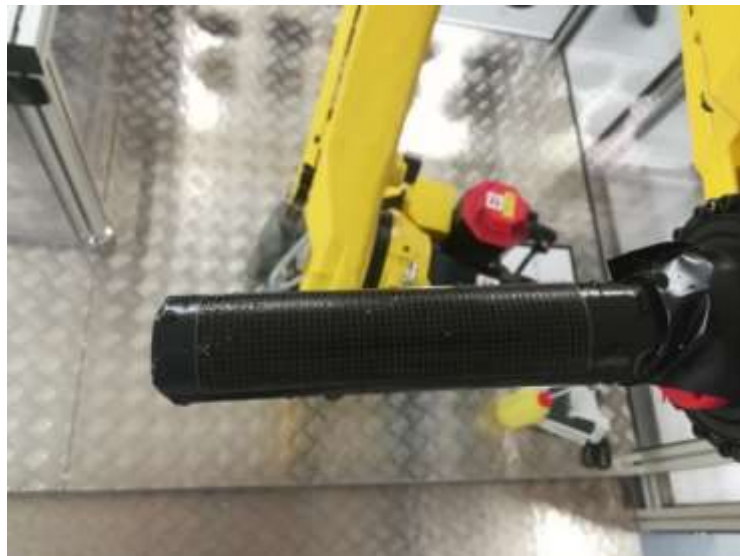
| Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Ochranná ablační vrstva | Počet sekvencí | Překrytí pulsů v řadě [%] | Překrytí řad [%] | Doba pulsu [ns] |
|-------------------|-------------------|---|-------------------------|----------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| 2,5 | 2 | 6,25 | Vinylová páska | 3 | 50 | 65 | 10 |



Obr. 6.2-5 Strategie umístění jednotlivých "výstřelů"

6.2.5 LSP modifikace povrchu trubky pro zkoušky korozního praskání

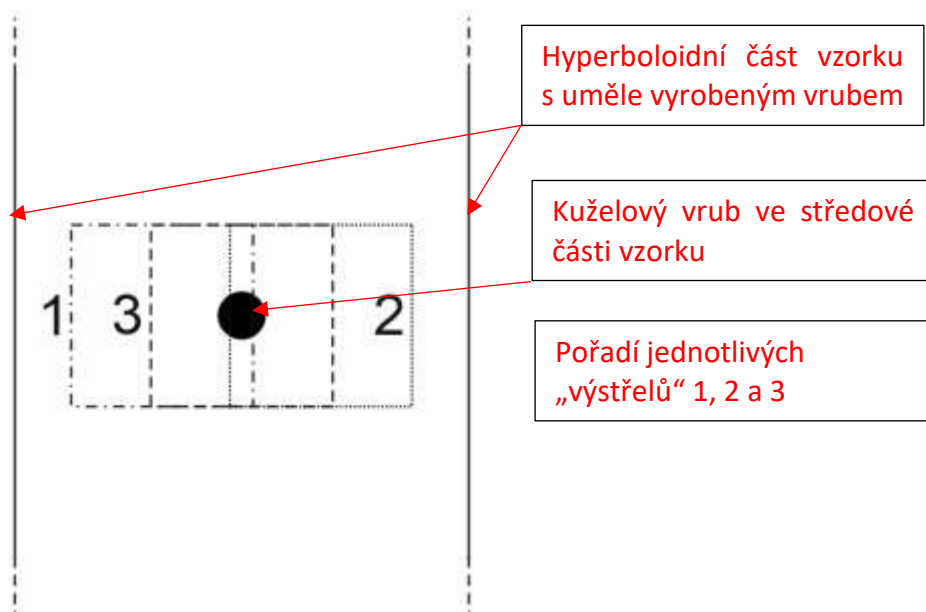
Pro aplikaci LSP byla použita bezešvá válcovaná trubka z materiálu GOST 08CH18N10T o vnitřním průměru 28 mm a tloušťky stěny 3,2 mm, která byla z jedné třetiny povrchu (plocha 40 x 110 mm) zpevněna technologií LSP. Zpevňování bylo provedeno v laboratoři LSP v Dolních Břežanech laserem L2. Parametry zpevňování byly: energie pulsu: 2,5 J, stopa laseru 2x2 mm, hustota pulsu 6,25 GW/cm², překrytí 50 % s použitím ochranné ablační vinylové pásy.



Obr. 6.2-6 Zpevněná trubka technologií LSP s ablační páskou

6.2.6 LSP zpevnění vrubu pro zkoušky vysokocyklické únavy na materiálu Böhler T552

Pro zpevnění povrchu v oblasti uměle vyrobené vady byla použita technologie LSP na pracovišti FZÚ v Dolních Břežanech využívající laserový systém L2. Pro zpevnění byly použity 3 varianty nastavení LSP procesu, viz Tab. 6-10. Strategie „střelby“ byla volena dle Obr. 6.2-7.



Obr. 6.2-7 Strategie a umístění jednotlivých "výstřelů"

Tab. 6-10 Parametry LSP pro jednotlivé varianty

| Označení varianty | Energie pulsu [J] | Průměr stopy [mm] | Hustota energie pulsu [GW/cm ²] | Počet sekvencí | Páska | Celkový překryv [%] |
|-------------------|-------------------|-------------------|---|----------------|-------|---------------------|
| LSP 3 | 4 | 2 | 10 | 5 | Vinyl | 50 |
| LSP 2 | 4 | 2 | 10 | 3 | Vinyl | 50 |
| LSP 1 | 4 | 2 | 10 | 1 | Vinyl | 50 |

6.3 Experimentální metodiky

Pro experimentální část této práce byla použita následující zařízení a postupy měření.

6.3.1 Měření zbytkového napětí na povrchu a pod povrchem materiálu

Pro ověření vlivu LSP na zpevnění povrchu a vnesení tlakového napětí bylo provedeno měření zbytkového napětí na rentgenovém difraktometru XRD RIGAKU AutoMATE II v laboratoři UC v USA metodou $\sin^2\psi$. Parametry nastavení difraktometru: trubice – Cr K alpha 1, urychlovací napětí 40 kV / 40 mA, vybraný vrchol s rentg. spektra - 129,15 deg, kolimátor - průměr 2 mm a oscilace $\pm 5^\circ$.

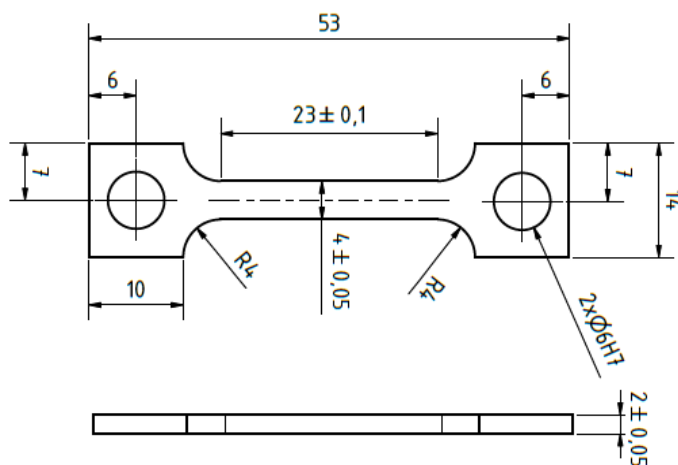
Pro zjištění hloubkového profilu byla použita odvrtávací metoda na zařízení Prism od firmy Stresstech. Vzorky pro první měření byly ve formě broušených destiček z materiálů GOST 08CH18N10T a Böhler T552. Hloubkový profil zbytkového napětí byl měřen do hloubky 1,5 mm před a po zpevnění materiálu. Z časových důvodů bylo hloubkové měření provedeno pouze v oblastech s nejvyššími naměřenými povrchovým napětími pomocí XRD techniky.

6.4 Ověření vlivu LSP na průběh mikrotvrdosti

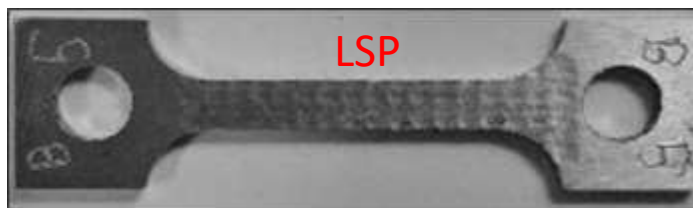
Pro ověření hloubky zpevnění materiálu bylo provedeno měření mikrotvrdosti na zařízení Durascan 70 v CVŘ. Mikrotvrdost byla měřena na příčném výbrusu ve směru 0° a 90° zkušební vzorku od zpevněného povrchu do středu se zatížením HV 0,005 a kroku $100\ \mu\text{m}$. Měření bylo provedeno dvakrát v každém směru.

6.4.1 Tahová zkouška zpevněných vzorků

Zkouška tahem patří mezi mechanické zkoušky, které charakterizují základní mechanické vlastnosti materiálů. Hlavním důvodem zařazení této zkoušky bylo zjištění vlivu zpevnění na základní hodnoty meze kluzu, mez pevnosti a tažnosti. Zkouška byla provedena na univerzálním trhacím stroji Zwick Z250 v laboratořích CVŘ. Pro každý stav materiálu byly použity 3 kusy zkušebních těles, tj. celkem 12 kusů. Zkouška byla provedena na plochých zkušebních tělesech dle standardů EN ISO 6892-1. Výkres zkušebního tělesa je uveden na Obr. 6.4-1.



Obr. 6.4-1 Výkres zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku



Obr. 6.4-2 Zkušební těleso po LSP

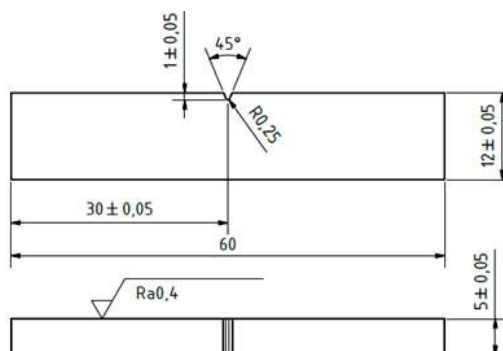
6.4.2 Únavové zkoušky v třibodovém ohybu

Pro prvotní ověření vlivu LSP na únavové chování materiálu byla použita zkouška vysokocyklické únavy v třibodovém ohybu. Tyto prvotní zkoušky měly za úkol ověřit citlivost nastavení LSP procesu na únavovou životnost zkoušených materiálů. Namáhání ohybem bylo zvoleno z důvodu použití velkého množství zkušebních těles, rychlosti a ceny výroby. Pro zkoušky VCÚ byl zvolen zkušební vzorek s V vrubem dle výkresu, viz Obr. 6.4-3. Vzorky byly vyrobeny ze zpevněných desek po LSP, viz Obr. 6.2-4. Zkušební tělesa byla vyrobena ze zpevněných desek z důvodu časové úspory LSP procesu a velkého vytížení laseru. Únavové zkoušky byly provedeny na elektromagnetickém rezonančním pulsátoru – RUMUL v laboratoři CVŘ. Parametry testu jsou uvedeny v Tab. 6-11. Stopovací podmínka byla zvolena na základě poklesu frekvence zatěžování o 20 HZ z důvodu konstrukce rezonanční pulsátoru RUMUL.

Napěťová hladina σ_{max} byla zvolena na základě zkoušek neovlivněného materiálu, kde průměrná životnost u materiálu Böhler T552 při daném σ_{max} byla 478815 cyklů, u GOST 08CH18N10T při daném σ_{max} byla 148 222 cyklů do lomu. Tyto hladiny namáhání byly voleny s ohledem na rychlost provedení zkoušek pro zmapování citlivosti LSP nastavení na odolnost proti cyklickému zatěžování.

Tab. 6-11 Parametry VCÚ v třibodovém ohybu

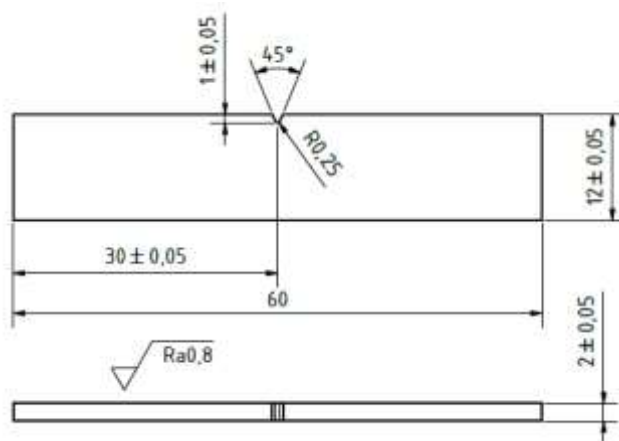
| Typ zatížení | Vzdálenost podpor [mm] | Zatěžující poměr | σ_{max} – Maximální napětí [MPa] | Frekvence [Hz] | Ukončení zkoušky při poklesu frekvence o [Hz] | Testovací teplota [°C] |
|-------------------|------------------------|------------------|--|----------------|---|------------------------|
| Třibodovým ohybem | 40 | 0,1 | 320 (GOST 08CH18N10T), 370 (BÖHLER T552) | 90-92 | 20 | 22 |



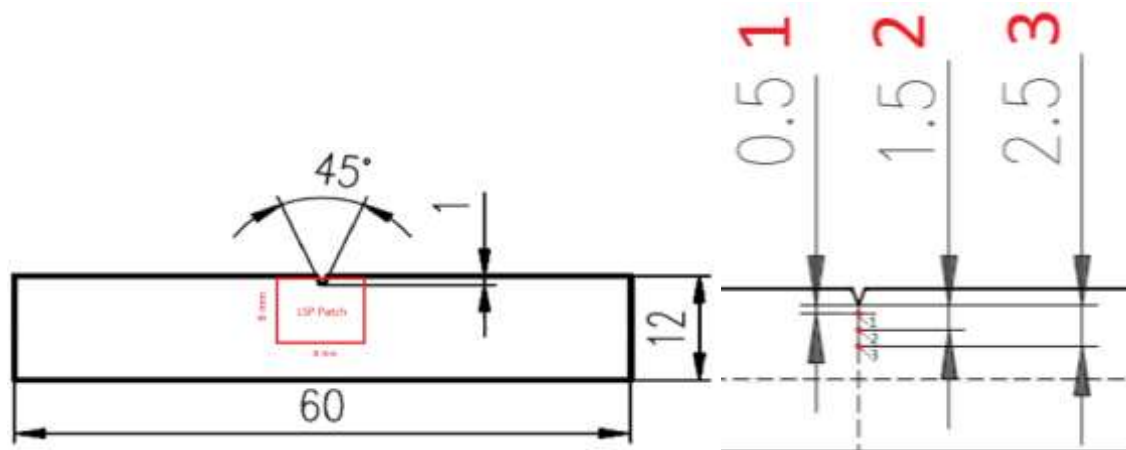
Obr. 6.4-3Výkres zkušební tělesa pro VCÚ v ohybu

6.4.3 Ověření vlivu strategie „střelby“ na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost

Cílem tohoto experimentu bylo redistribuovat tlakové napětí do nejvíce namáhané oblasti únavového vzorku pomocí LSP procesu. Cílená redistribuce tlakového napětí byla provedena použitím strategie „střelby“, která se liší oproti klasické „řádkové“ tím, že jednotlivé „výstřely“ budou posouvat tlakové napětí do nejkritičtějšího místa. Vliv strategie „střelby“ byl ověřen pomocí měření zbytkového napětí a zkoušky VCÚ v tříbodovém ohybu. Tvar zkušební vzorku je obdobný z předchozích testů VCÚ v ohybu. Použitý materiál je austenitická ocel GOST 08CH18N10T ze stejné tavby jako v předešlých experimentech. Tvar a rozměry vzorku jsou na Obr. 6.4-4. Zkušební vzorek byl vyroben s V vrubem, který přesně definuje nejkritičtější místo z pohledu mechanického namáhání.



Obr. 6.4-4 Výkres vzorku pro tříbodový ohyb



Obr. 6.4-5 Ovlivněná plocha LSP technologií (vlevo) a měřené oblasti zbytkového napětí (vpravo)

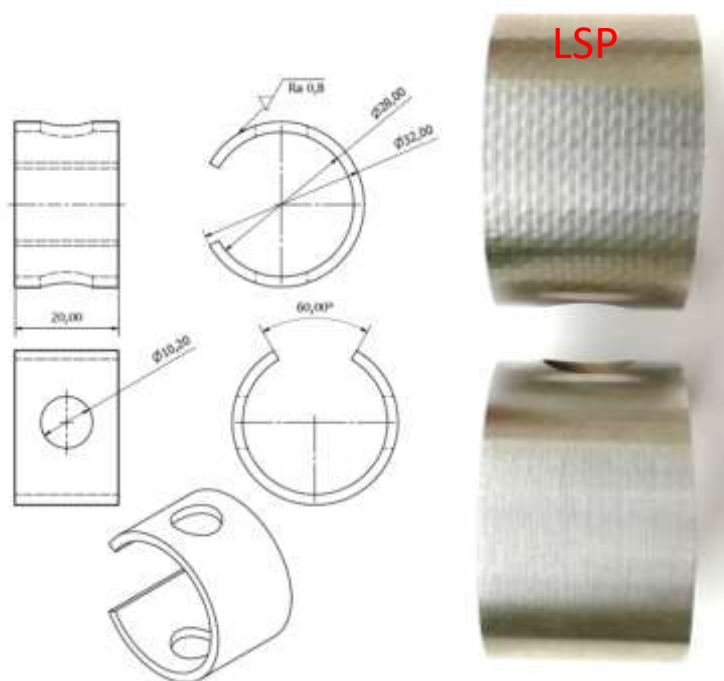
Ověření řízené redistribuce zbytkového napětí bylo na základě měření zbytkového napětí na rentgenovém difraktometru.

Pro ověření zvýšené odolnosti proti únavovému poškození byl zvolen test VCÚ v tříbodovém ohybu. Únavové zkoušky byly provedeny na Elektrodynamickém pulsátoru – RUMUL v režimu síly. Vzorky byly namáhány tříbodovým ohybem se vzdáleností podpor 40 mm, $R = 0,1$, frekvencí 90-92 Hz, stopovací podmínka byla při poklesu frekvence o 20 Hz, teplota testování byla 22 °C. Hodnota únavové životnosti pro jednotlivá zkušební tělesa byla vyhodnocena při poklesu delta frekvence o 20 Hz (trhlina se šířila cca. do poloviny výšky zkušebního tělesa).

6.4.4 Zkouška korozního praskání v prostředí roztoku chloridu hořečnatého

Zkouška korozního praskání byla provedena v rámci diplomové práce Ing. Jany Zavitkovské „Úprava povrchových vlastností austenitických ocelí s ohledem na korozní odolnost“, kde disertant působil jako konzultant práce a podílel se na experimentech [45]. Zkouška korozního praskání na materiálu GOST 08CH18N10T byla provedena pro ověření vhodnosti použití technologie LSP pro zvýšení odolnosti austenitického materiálu proti koroznímu praskání. Pro prvotní ověření vlivu LSP na korozní praskání oceli byla provedena expoziční zkouška ve vodném roztoku chloridu hořečnatého dle normy ASTM G 36, která patří mezi zrychlené zkoušky pro hodnocení odolnosti proti koroznímu praskání.

Pro expoziční zkoušku byl zvolen vzorek typu C předepnutý pomocí šroubového spoje. Zkušební vzorky byly vyrobeny jak ze zpevněné trubky, tak ze základního materiálu trubky. Rozměry a vzhled vzorků jsou na Obr. 6.4-6. Zpevněná oblast byla orientovaná do oblasti tahového namáhání vzorku. Vzorek byl předepnut nerezovým austenitickým šroubem M10 utahovacím momentem 0,25 Nm. Utahovací moment odpovídal maximálnímu tahovému namáhání na povrchu zkoušeného vzorku, které bylo pod mezí kluzu materiálu GOST 08CH18N10T. Napětí bylo naměřeno a kontrolováno pomocí tenzometrického měření, které doporučuje norma ASTM G 36.



Obr. 6.4-6 Výkres vzorku (vlevo) a zpevněný a nezpevněný vzorek (vpravo)

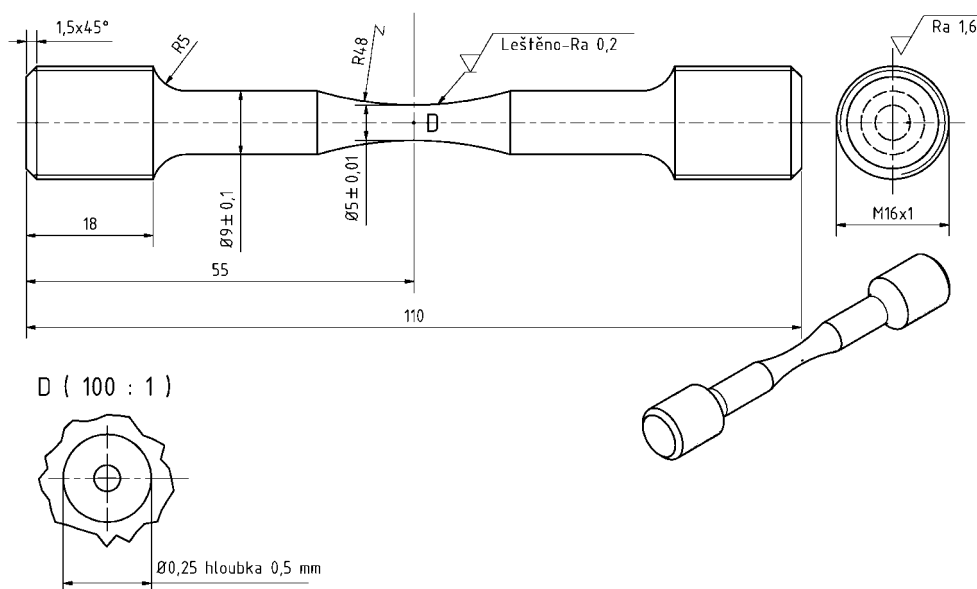
Zkušební prostředí expoziční zkoušky tvořil vroucí vodný roztok chloridu hořečnatého při teplotě cca 155 °C. Pro zkoušku bylo použito 3000 g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ a 75 ml destilované vody. Teplota prostředí se udržovala na hodnotě 155 ± 1 °C. Zkušební vzorky byly v korozním prostředí 20 hod. Po 20hodinové expozici byly vzorky vyčištěny v destilované vodě a podrobeny vizuální kontrole na SEM a SM.

6.4.5 Zkouška VCÚ s uměle vyrobeným korozním bodem

Zkouška VCÚ byla zařazena do experimentálního programu z důvodu možnosti použití LSP pro opravu provozovaných parních turbín na klasických uhelných elektrárnách či teplárnách.

Z historie i současnosti je známo, že mezi nejčastější příčinou poruch parních turbín patří defekt oběžné lopatky či destrukce celého stupně oběžných lopatek nejčastěji zapříčiněním vznikem bodové koroze, která působí jako vrub a napomáhá vzniku únavové trhliny. Podrobnější zdůvodnění je v kapitole Zdůvodnění experimentálního programu. Hlavním cílem experimentu bylo prokázat, že zpevněním povrchu v oblasti uměle vytvořeného vrubu simulujícím korozní důlek, lze potlačit vznik a šíření únavové trhliny. Pro zkoušky byl použit materiál Böhler T522, který je standardně používán jako lopatková ocel firmou Doosan Škoda Power s.r.o. na výrobu oběžných lopatek L-1 řad nízkotlakých stupňů parních turbín. Testované prostředí bylo vzduch a parní kondenzát. Zkoušky VCÚ byly provedeny ve společnosti CVŘ s.r.o. ve spolupráci s Ing. Josefem Strejciusem.

Pro zkoušky VCÚ byla použita zkušební tělesa s geometrií typu „přesýpacích hodin“, viz Obr. 6.4-7. Zkušební tělesa byla vyrobena třískovým obráběním s finálním jemným broušením pracovní části na jakost povrchu odpovídající brusnému papíru P2000. Podélná osa zkušebních těles byla rovnoběžná se směrem válcování materiálu Böhler T522.

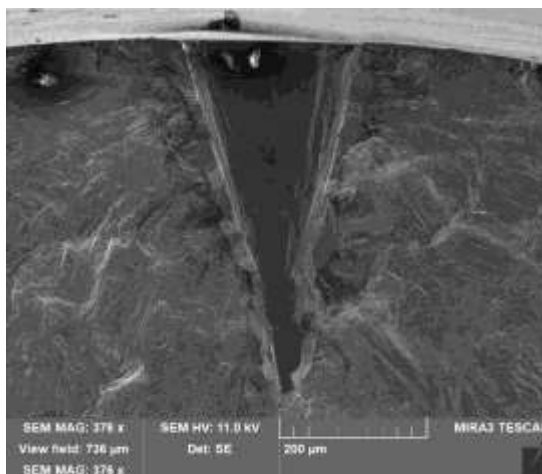


Obr. 6.4-7 Zkušební těleso pro VCÚ s uměle vyrobeným vrubem

Ve středové části funkční části zkušebního tělesa byl vytvořen umělý vrub simulující korozní bod. Vývrt byl použit z důvodu opakovatelnosti a přesnosti výroby, jelikož vytvoření stejných korozních vrubů chemickou cestou je značně problematické a časově náročné. Průměr a hloubka vrubu byla zvolena na základě výzkumné zprávy 58/19/081 „Hodnocení vlivu korozních důlků na rozvoj únavového porušování oběžných lopatek NT dílů parních turbín“ [39]. Z výzkumné zprávy vyplývá, že kritický defekt pro vznik a šíření trhliny u lopatky L-1 parní turbíny 110 MW odpovídá hloubce 500 μ m a velikosti 250 μ m [39].

Umělé defekty byly vyrobeny pomocí pulsního laseru s dobou trvání pulsu 3 ns, energií 50 mJ a opakovací frekvencí 500 kHz. Laserový svazek měl průměr 39 μ m. Aby se dosáhlo požadovaného průměru bodu, laserový svazek se systematicky pohyboval spirálovitě od okrajů směrem ke středu. Rychlost pohybu byla 700 mm/s. Laserovým vrtáním byl vytvořen kuželový vývrt s hloubkou 500 μ m pro série 1 až 4 a 650 μ m pro zkoušku v parním kondenzátu (série 5). Vyšší hloubka u vzorků pro zkoušky v parním kondenzátu nebyla vytvořena záměrně, ale z důvodu dodatečné výroby vzorků a patrně pozměněnými parametry nastavení

vrtacího laseru. Na Obr. 6.4-8 je snímek lomové plochy po zkoušce VCÚ, který reprezentuje tvar vrubu.



Obr. 6.4-8 Reálný tvar uměle vyrobeného vrubu na lomové ploše zkušební tělesa

Pro optimalizaci LSP procesu byla zhotovena zkušební tělesa s uměle vyrobenými vruby odpovídající vrubům zkušebních těles pro VCÚ. Vyhodnocení optimálního nastavení LSP procesu bylo pomocí topografické analýzy na SEM, kde se hodnotil stav povrchu pro LSP (přítomnost trhlin, defektů, zdeformování povrchu atd.)

Test VCÚ byl proveden na pěti sériích zkušebních těles. První čtyři série zkušebních těles byly testovány na vzduchu. Pátá série byla zkoušena v prostředí parního kondenzátu (demineralizovaná voda s obsahem chloridů v jednotkách ppm) při teplotě 100 °C, kdy kyslík byl redukován varem. V Tab. 6-12 jsou uvedeny podmínky testování jednotlivých sérií.

Všechna zkušební tělesa byla testována při stejných zatěžujících parametrech v režimu tah/tlak při středním napětí $\sigma_m=300$ MPa a frekvenci cca 125 Hz na elektromagnetickém pulsátoru RUMUL se silovou kapacitou 250 kN. Zatěžující parametry zkoušek VCÚ byly zvoleny na základě reálného namáhání lopatek parních turbín L-1 stupně, viz literární zdroj [40].

Tab. 6-12 Parametry zkoušených sérií

| Označení série vzorků | Základní materiál (ZM)/LSP | Defekt | Prostředí |
|--|----------------------------|-----------|----------------------------|
| č.1 - vzorky bez defektu, leštěný povrch | ZM | Bez vrubu | Vzduch |
| č.2 - vzorky s defektem, leštěný povrch | ZM | S vrubem | Vzduch |
| č.3 - vzorky s defektem + LSP1 | LSP1 | S vrubem | Vzduch |
| č.4 - vzorky s defektem + LSP2 | LSP2 | S vrubem | Vzduch |
| č.5 - vzorky s defektem + LSP2 v parním kondenzátu | LSP2 | S vrubem | Parní kondenzát při 100 °C |

6.4.6 Fraktografická expertiza lomových ploch zkušebních těles s vruby po VCÚ

Lomové plochy získané ukončenými únavovými zkouškami byly podrobeny makrofraktografickému a mikrofraktografickému rozboru. Byl k tomu využit stereomikroskop (SM) a skenovací elektronový mikroskop (SEM - TESCAN MIRA 3GMU). Fraktografická analýza měla za účel identifikovat místo ohniska šíření trhlin a vliv LSP na charakter šíření trhlin. Z vhodných snímků byly analyzovány základní rysy lomových ploch (LP) zahrnující obrys zkušební tyče, polohu ohniska/ohnisek únavových trhlin, velikost a tvar vyrobeného vrubu.

7 Výsledky

Výsledky z provedených experimentů jsou shrnuty v níže uvedených kapitolách.

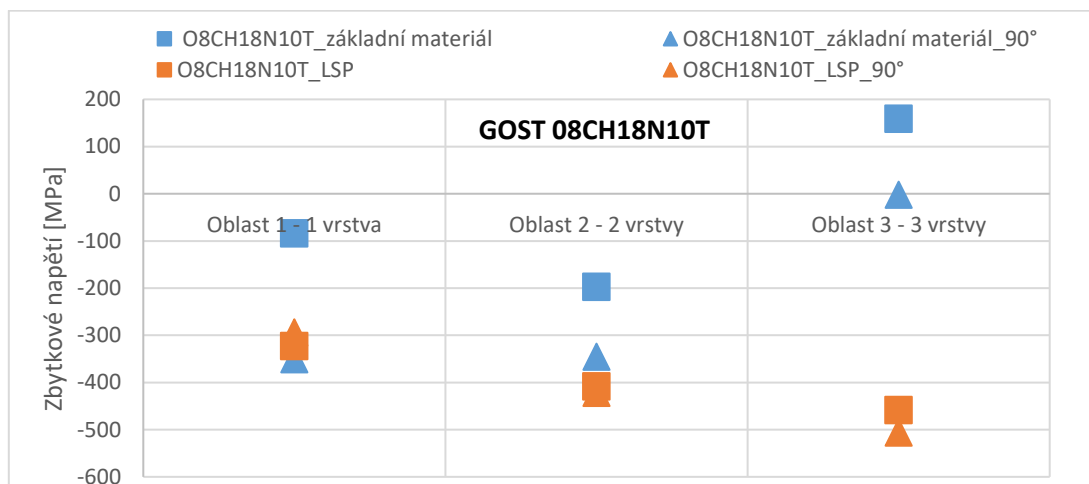
7.1 Měření zbytkového napětí na povrchu a pod povrchem materiálu

Výsledky naměřených hodnot zbytkového napětí na povrchu jsou uvedeny v Tab. 7-1, Obr. 7.1-1 a Obr. 7.1-2. Z naměřených hodnot zbytkových napětí na materiálu GOST O8Ch18N10T vyplývá, že v základním materiálu bez LSP jsou tlaková a tahová napětí. Tento jev může být způsoben tvářením materiálu, anizotropií mikrostruktury v různých směrech či způsobem broušení zkušební destičky. Nejvyššího zpevnění z pohledu vneseného zbytkového napětí bylo docíleno v oblasti 3 se třemi vrstvami, kde ve směru 0° byl naměřen rozdíl více jak 800 MPa. Takto velký rozdíl byl způsoben i přítomností tahových napětí před zpevněním povrchu.

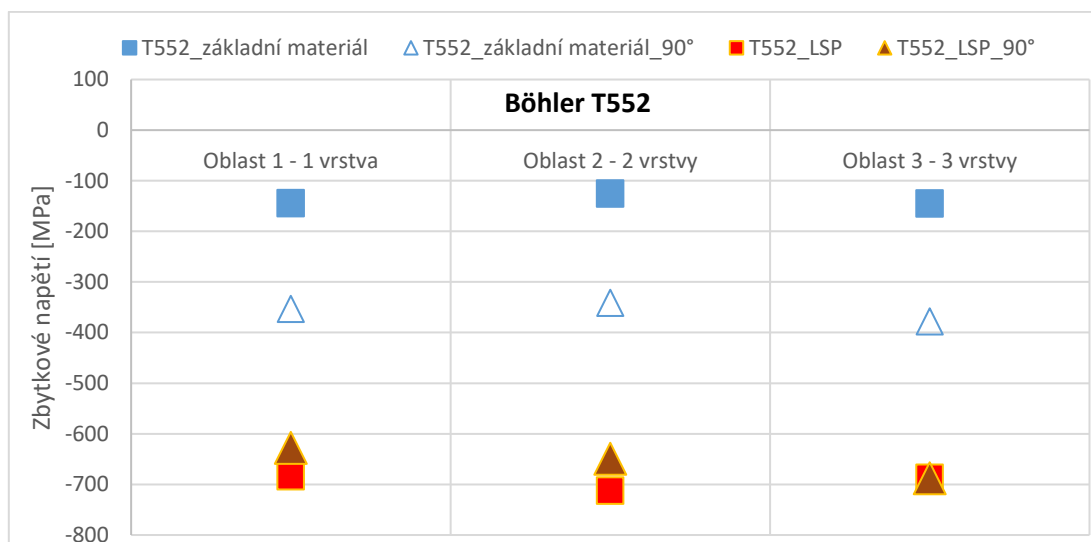
Z naměřených hodnot zbytkových napětí na materiálu Böhler T552 vyplývá, že v základním materiálu bez LSP jsou pouze tlaková napětí, která se liší ve směru 0° a 90°. Tento jev může být způsoben tvářením materiálu či anizotropií mikrostruktury v různých směrech. Nejvyššího zpevnění z pohledu vneseného zbytkového napětí bylo docíleno ve druhé oblasti se dvěma vrstvami, kde ve směru 0° byl naměřen rozdíl 587 MPa. Příčina naměření vyššího zpevnění ve druhé oblasti než ve třetí je patrně ve vyčerpání plasticity materiálu, a tím pádem zmenšení schopnosti deformace za studena.

Tab. 7-1 Naměřené hodnoty zbytkového napětí metodou XRD

| | Orientace | Oblast 1 - RS [MPa] | SMODCH | Oblast 2 - RS [MPa] | SMODCH | Oblast 3 - RS [MPa] | SMODCH |
|------------------------------|-----------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| O8CH18N10T_základní materiál | 0° | -84 | 0 | -198 | 23 | 159 | 71 |
| O8CH18N10T_základní materiál | 90° | -351 | 0 | -345 | 24 | -2 | 23 |
| O8CH18N10T_LSP | 0° | -323 | 20 | -408 | 6 | -459 | 14 |
| O8CH18N10T_LSP_90° | 90° | -294 | 21 | -422 | 8 | -506 | 26 |
| T552_základní materiál | 0° | -145 | 13 | -126 | 16 | -146 | 1 |
| T552_základní materiál | 90° | -354 | 3 | -342 | 7 | -378 | 2 |
| T552_LSP | 0° | -685 | 9 | -713 | 6 | -688 | 10 |
| T552_LSP_90° | 90° | -628 | 16 | -649 | 28 | -688 | 1 |

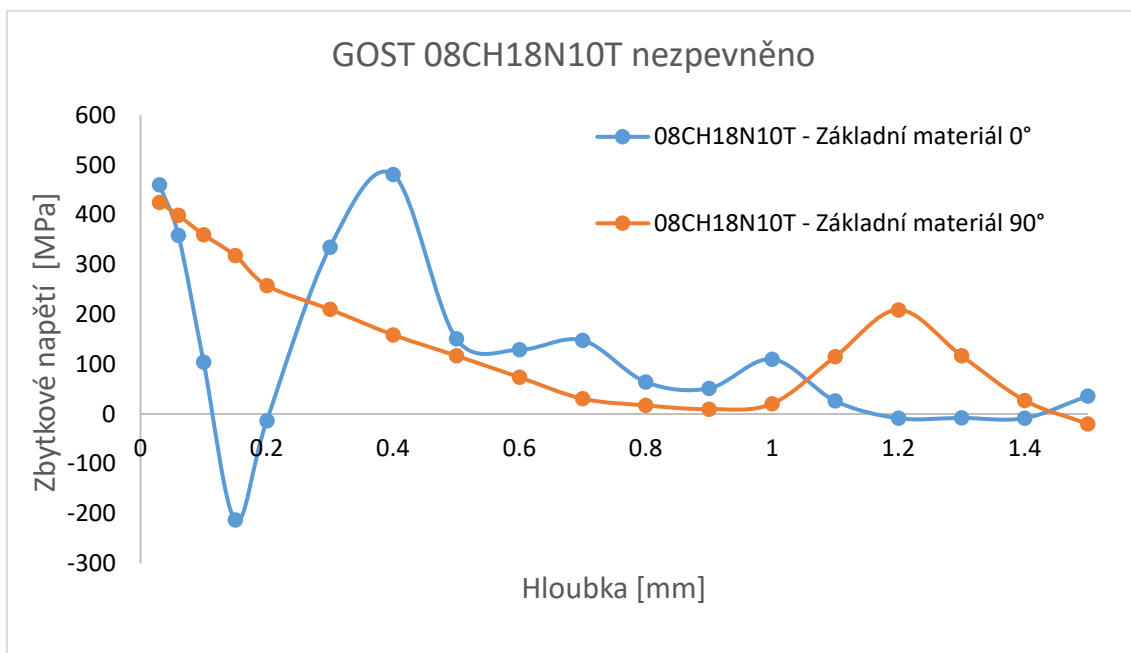


Obr. 7.1-1 Naměřené hodnoty zbytkového napětí před a po LSP pro GOST 08CH18N10T

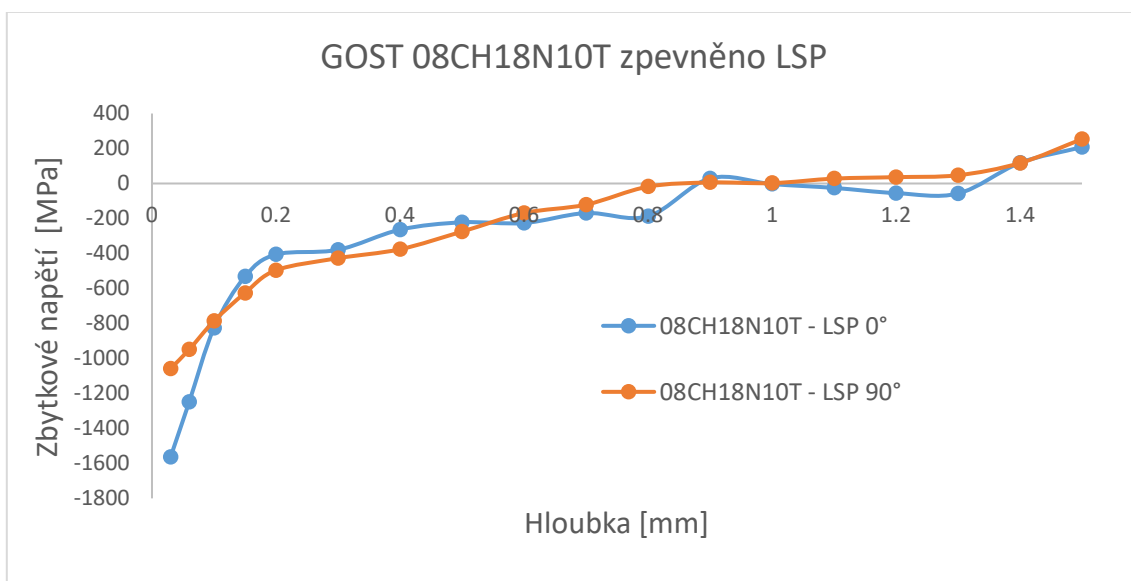


Obr. 7.1-2 Naměřené hodnoty zbytkového napětí před a po LSP pro Böhler T552

Výsledky z hloubkového měření zbytkového napětí jsou uvedeny níže. Na Obr. 7.1-3 je v grafu znázorněn průběh zbytkového napětí od hloubky 0,05 mm do hloubky 1,5 mm materiálu GOST 08CH18N10T v nezpevněném základním stavu. Z grafu je patrné, že pod povrchem převládá tahové napětí v obou směrech v celé měřené hloubce. Na Obr. 7.1-4 je záznam hloubkového profilu po zpevnění. V obou směrech došlo k výraznému zpevnění až k hodnotám 1500 MPa v tlaku do hloubky 1 mm.

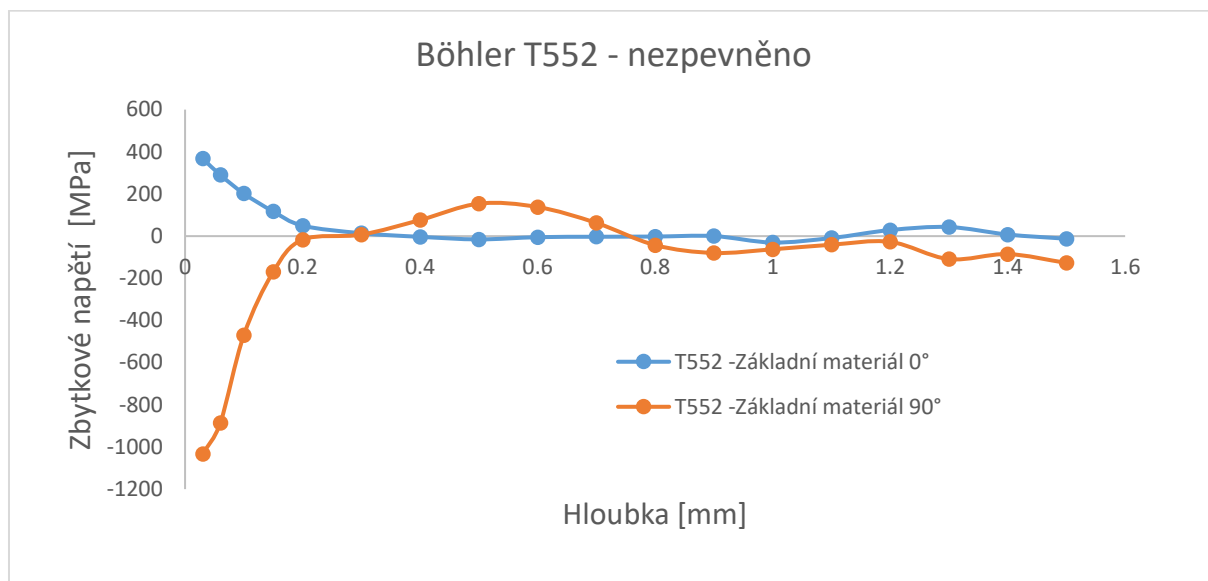


Obr. 7.1-3 Hloubkový profil GOST 08CH18N10T (oblast 3) – nezpevněný stav

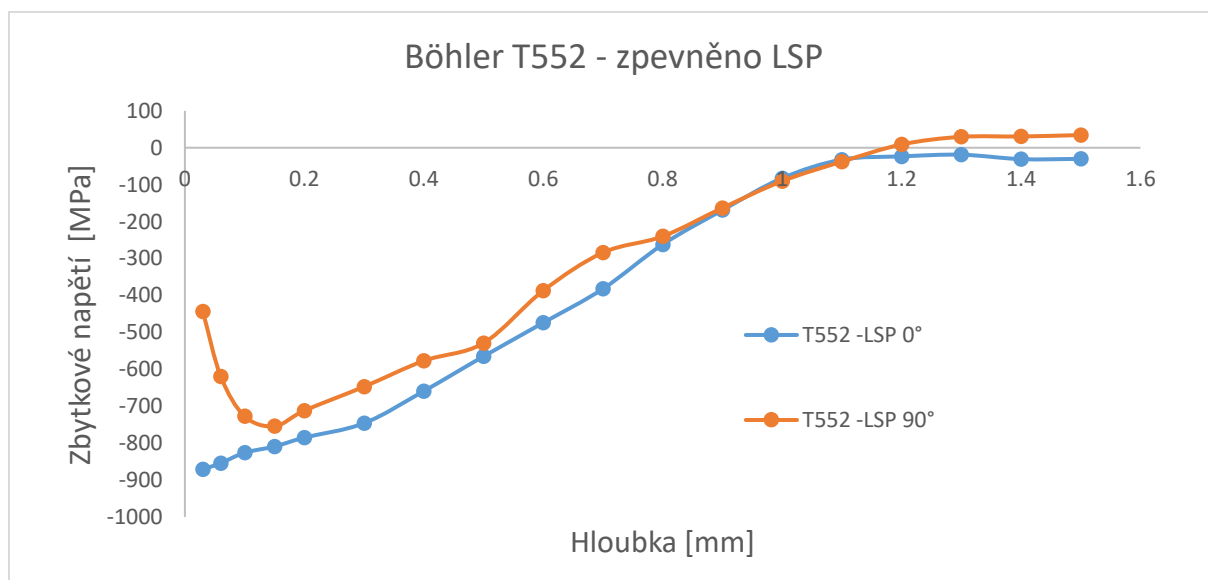


Obr. 7.1-4 Hloubkový profil GOST 08CH18N10T (oblast 3) – zpevněný povrch po LSP

Na Obr. 7.1-5. je znázorněn průběh zbytkového napětí od hloubky 0,05 mm do hloubky 1,5 mm u materiálu Böhler T552 v nezpevněném základním stavu. V hloubce do 0,2 mm se vyskytuje ve směru 90° tlakové napětí s hodnotou až -1000 MPa, které je s největší pravděpodobností způsobené směrem válcování daného materiálu a přípravou povrchu zkušebního vzorku – broušením. Ve směru 0° je přítomno pouze tahové napětí. Hodnoty zbytkového napětí materiálu Böhler T552 po zpevnění technologií LSP jsou zobrazeny na Obr. 7.1-6, kde do hloubky 1,1 mm bylo naměřeno pouze tlakové napětí.



Obr. 7.1-5 Hloubkový profil Böhler T552 (oblast 2)- nezpevněný stav



Obr. 7.1-6 Hloubkový profil Böhler T552 (oblast 2) – zpevněný povrch po LSP

7.2 Ověření vlivu LSP na průběh mikrotvrdosti

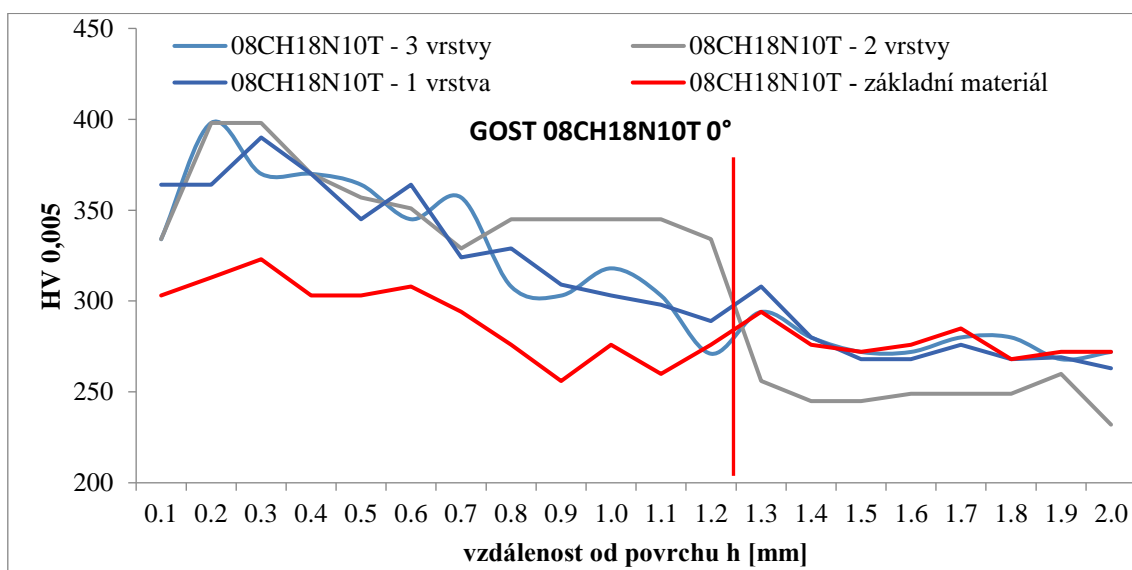
Výsledky z měření mikrotvrdosti na GOST 08CH18N10T jsou uvedeny na Obr. 7.2-1 a Obr. 7.2-2 přičemž hloubkové profily tvrdosti jsou průměrné hodnoty z dvou měření. Z měření hloubkového profilu mikrotvrdosti na oceli GOST 08CH18N10T je patrné, že technologií LSP došlo ke zpevnění materiálu až do hloubky 1,9 mm ve směru 90°. Nejvyšší i největší zpevnění bylo naměřeno v oblasti 2 s dvěma vrstvami zpevnění.

Výsledky z měření na Böhler T552 jsou uvedeny na Obr. 7.2-3 a Obr. 7.2-4. Navýšení tvrdosti je více patrné ve směru 90°, kde v hloubce 1,4 mm byla naměřena ve všech zpevněných oblastí tvrdost o 60 HV vyšší. Zpevnění bylo dle měření mikrotvrdosti zjištěno až do hloubky 1,7 mm.

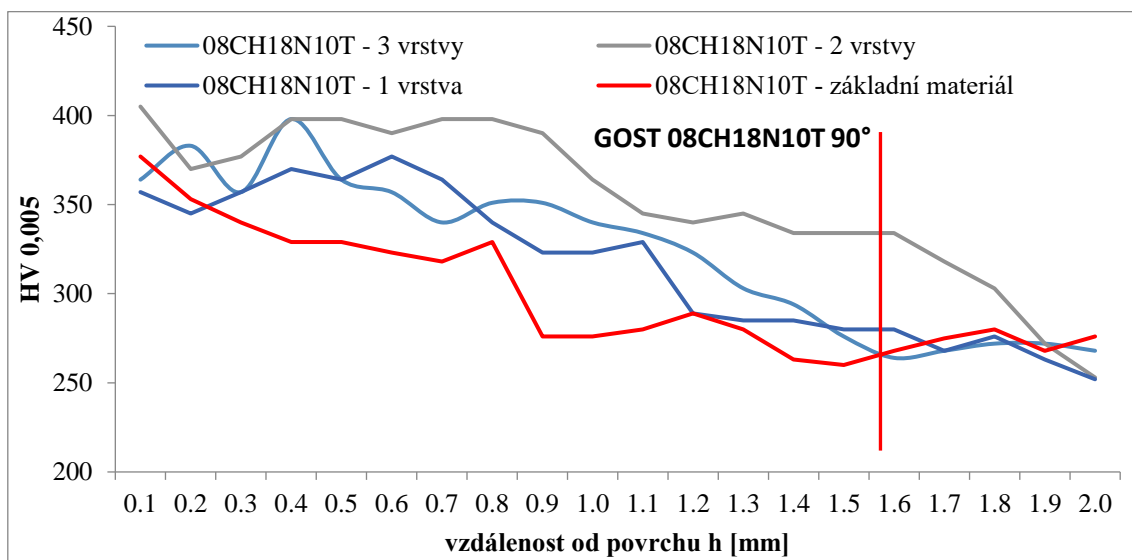
U obou materiálů byly počáteční hodnoty mikrotvrdosti naměřené podobné ve zpevněných tak i nezpevněných místech, cca do 0,7 mm. Tento jev zřejmě způsobilo broušení zkušebních destiček před zpevněním jako u měření zbytkového napětí.

U materiálu GOST 08CH18N10T bylo dle měření dosaženo nejvyšší tvrdosti v hloubce v oblasti 2 s dvěma vrstvami zpevnění, přičemž těsně pod povrchem byly naměřeny obdobné hodnoty tvrdosti na povrchu jako v oblasti 3. To odpovídá měřením zbytkového napětí.

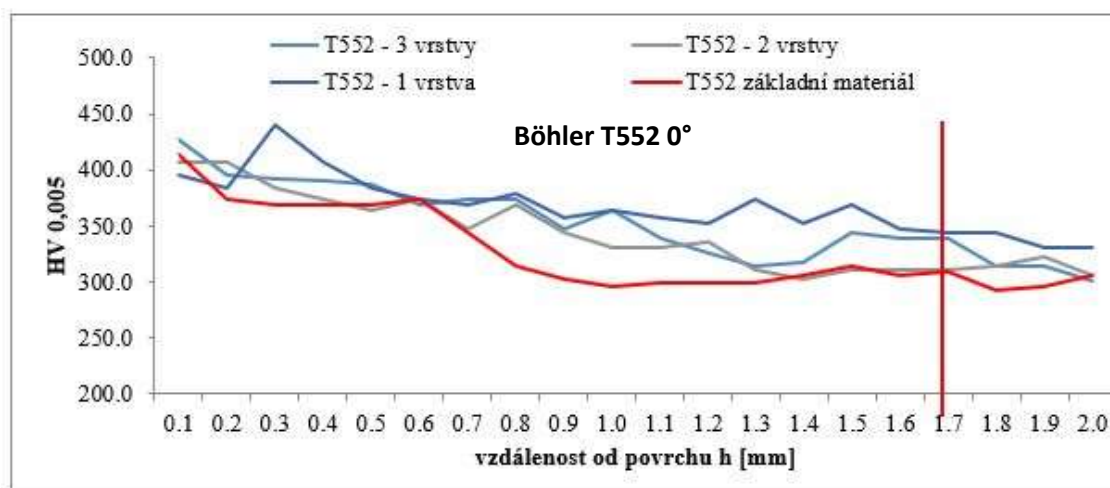
Materiál Böhler T552 dle měření mikrotvrdosti vykazoval menší vliv z pohledu použití počtu vrstev zpevnění. Nejvyšších hodnot tvrdosti bylo naměřeno v oblasti 3 ve směru 90°.



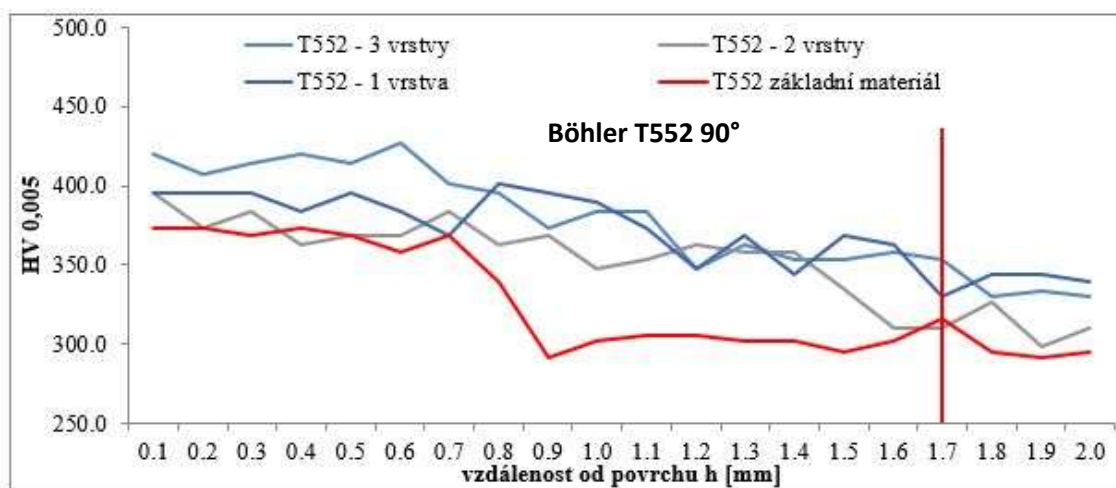
Obr. 7.2-1 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP GOST 08CH18N10T pro orientaci 0°



Obr. 7.2-2 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP GOST 08CH18N10T pro orientaci 90°



Obr. 7.2-3 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP Böhler T552 pro orientaci 0°



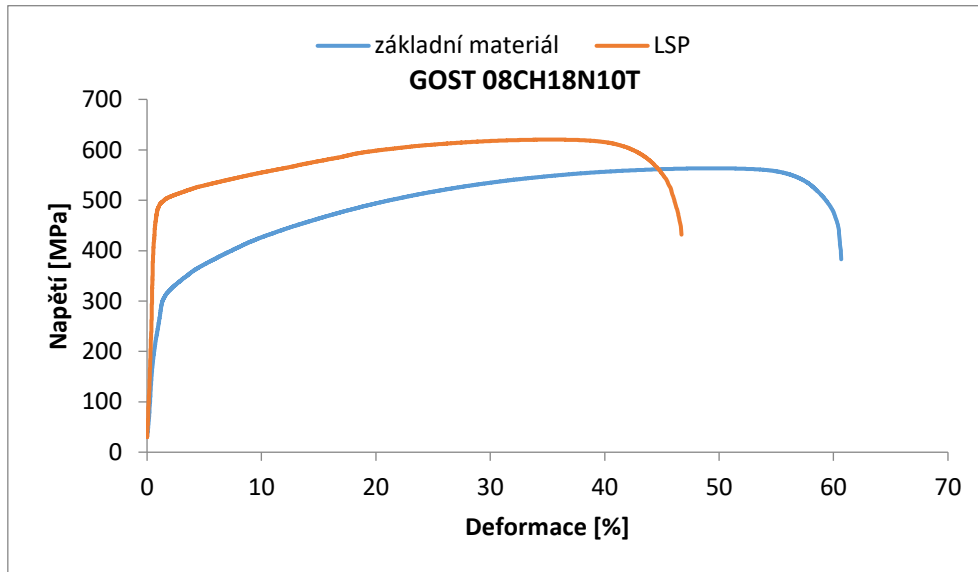
Obr. 7.2-4 Průběh mikrotvrdosti materiálu před a po LSP Böhler T552 pro orientaci 90°

7.3 Tahová zkouška zpevněných vzorků

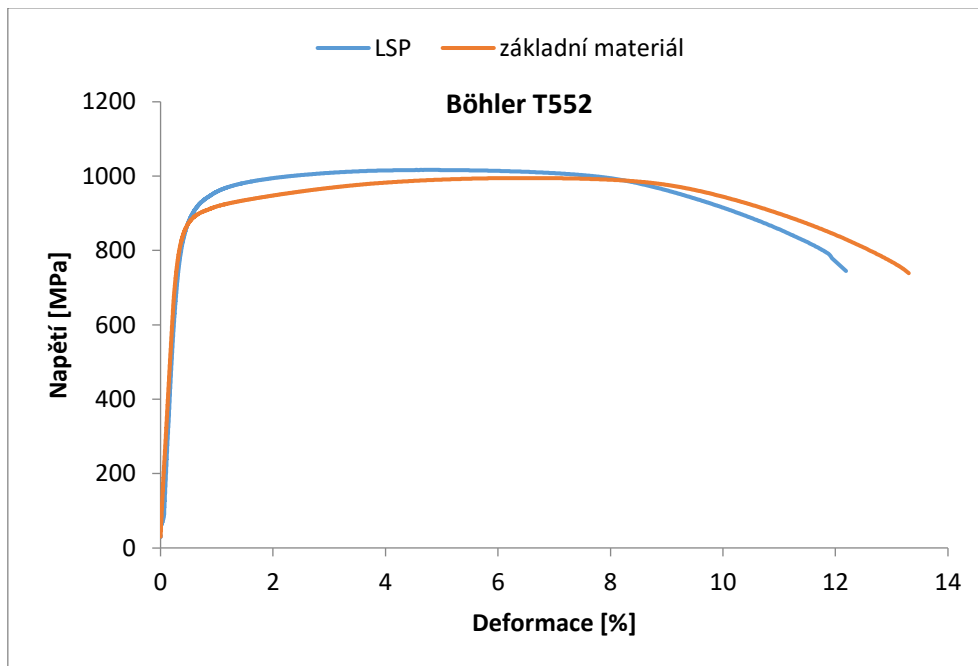
Naměřené hodnoty po tahové zkoušce jsou uvedeny v Tab. 7-2. Z výsledků je patrné že u oceli GOST 08CH18N10 došlo k výraznému navýšení smluvní meze kluzu i pevnosti, a to na mezi kluzu o cca 40 % přičemž došlo k mírnému snížení tažnosti. U oceli Böhler T552 došlo k nepatrnému navýšení meze kluzu i pevnosti.

Tab. 7-2 Výsledky z tahových zkoušek

| | Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost [%] | Kontrakce [%] |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|-------------|---------------|
| 08CH18N10T-základní materiál | 277±10 | 554±3 | 60±3 | 56±1 |
| 08CH18N10T - LSP | 481±11 | 633±12 | 46±1 | 45±3 |
| T552 - základní materiál | 880±12 | 1008±8 | 17±1 | 38±4 |
| T552 - LSP | 890±7 | 1016±7 | 16±1 | 35±3 |



Obr. 7.3-1 Tahový diagram pro GOST 08CH18N10T



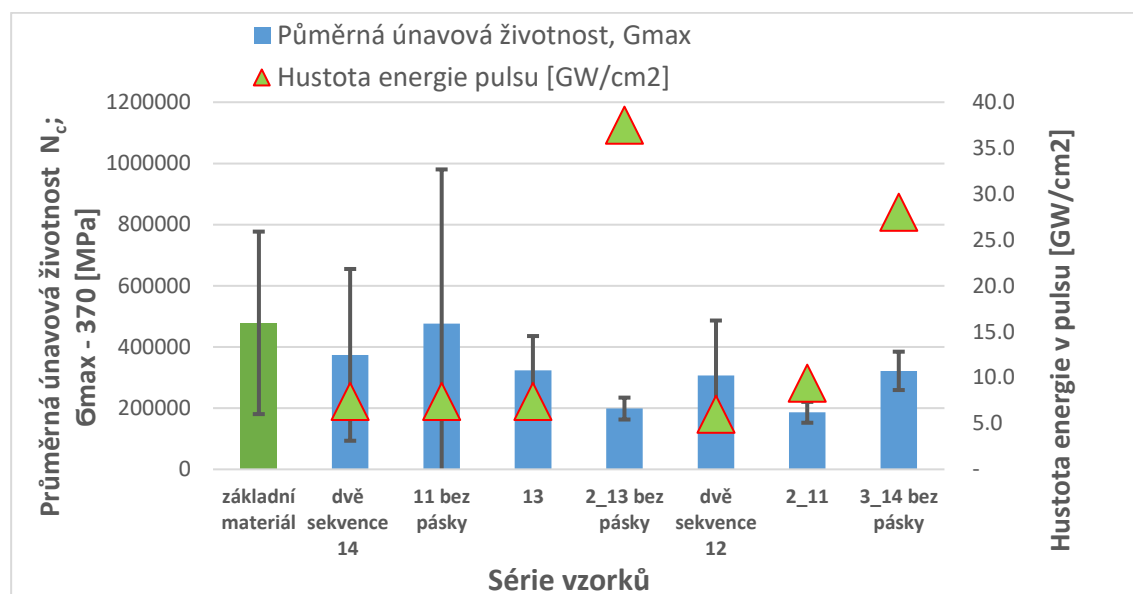
Obr. 7.3-2 Tahový diagram pro Böhler T552

7.4 Únavové zkoušky v tříbodovém ohybu

Souhrnné výsledky únavových zkoušek při maximálním napětí σ_{\max} a zatěžujícím poměru R 0,1 jsou uvedeny v Tab. 7-3 pro Böhler T552. Z naměřených dat je patrné, že zpevněný materiál všech sérií vykazuje horší únavové vlastnosti než nezpevněný.

Tab. 7-3 Výsledky z VCÚ materiálu Böhler T552

| Označení série vzorků | Materiál | Průměrná únavová životnost, σ_{max} [MPa] | SMODCH | Počet vzorků |
|-----------------------|------------------------------------|--|---------|--------------|
| základní materiál | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 478.815 | 298.276 | 10 |
| dvě sekvence 14 | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 374.218 | 280.732 | 10 |
| 11 bez pásky | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 476.608 | 503.744 | 11 |
| 13 | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 323.341 | 112.377 | 9 |
| 2_13 bez pásky | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 198.637 | 35.788 | 5 |
| dvě sekvence 12 | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 306.401 | 180.040 | 5 |
| 2_11 | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 186.409 | 34.098 | 5 |
| 3_14 bez pásky | T552 - (σ_{max} - 370 MPa) | 321.893 | 62.680 | 10 |

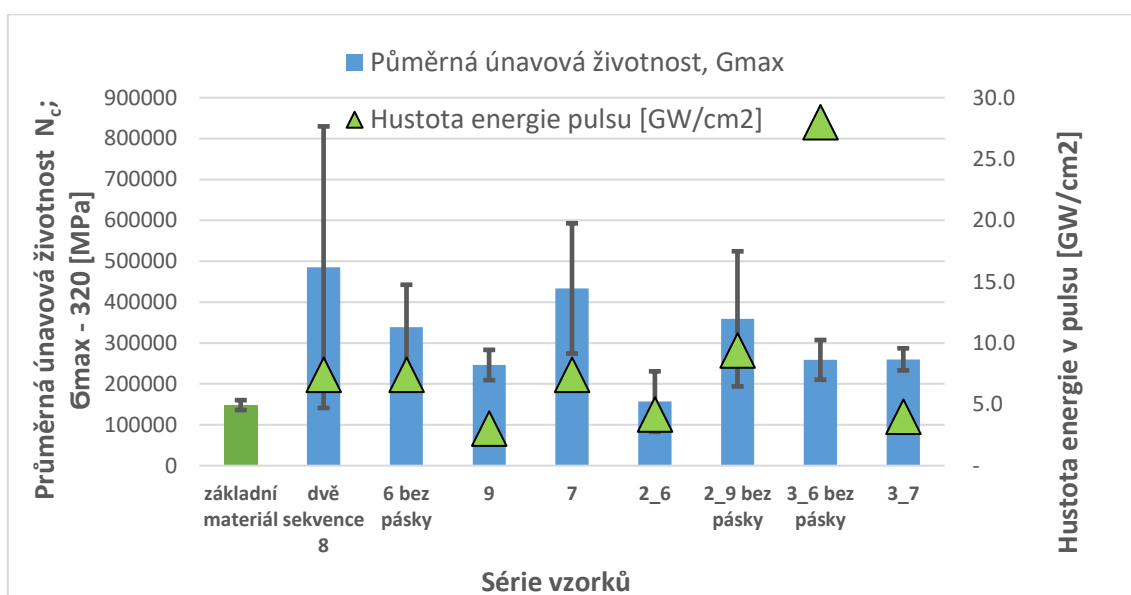


Obr. 7.4-1 Výsledky ze zkoušek VCÚ materiálu Böhler T552

Souhrnné výsledky únavových zkoušek při maximálním napětí σ_{max} a zatěžujícím poměru R 0,1 jsou uvedeny v Tab. 7-4 pro GOST 08CH18N10T. Z naměřených dat je patrné, že zpevněný materiál dosahuje u většiny sérií vzorků vyšší životnost na dané hladině napětí než nezpevněný základní materiál. Problém je s velkým rozptylem naměřených hodnot. Tento rozptyl hodnot byl zřejmě způsoben nehomogenitou zpevnění a nedobře zvolenou strategií zpevnění.

Tab. 7-4 Výsledky z VCÚ materiálu GOST 08CH18N10T

| Označení série vzorků | Materiál | Průměrná únavová životnost, σ_{max} [MPa] | SMODCH | Počet vzorků |
|-----------------------|--|--|---------|--------------|
| základní materiál | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 148.222 | 12.016 | 8 |
| dvě sekvence 8 | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 485.560 | 344.386 | 12 |
| 6 bez pásky | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 338.763 | 103.763 | 12 |
| 9 | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 246.245 | 36.980 | 11 |
| 7 | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 433.617 | 159.238 | 11 |
| 2_6 | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 156.784 | 73.995 | 10 |
| 2_9 bez pásky | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 359.140 | 165.211 | 10 |
| 3_6 bez pásky | 08CH18N10T - (σ_{max} - 320 MPa) | 258.778 | 48.607 | 10 |



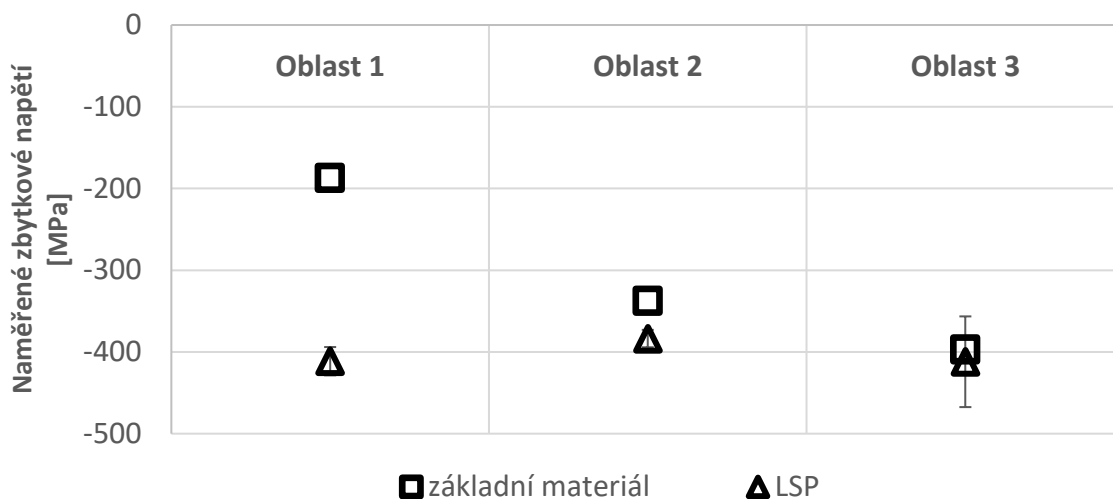
Obr. 7.4-2 Výsledky ze zkoušek VCÚ materiálu GOST 08CH18N10T

Z prvotních únavových testů materiálu Böhler T552 vyplývá, že způsob zpevnění LSP technologií neměl pozitivní vliv na únavovou životnost VCÚ v tříbodovém ohybu na hladině napětí $\sigma_{max} = 370$ MPa a zatěžujícím poměru R 0,1. Dalším problémem byl naměřený rozptyl hodnot, který s největší pravděpodobností souvisí s mikročistotou oceli. Zhoršení únavových vlastností mohlo být způsobeno přípravou únavových vzorků ze zpevněných desek, kdy vlivem rozřezu mohlo dojít k poklesu vneseného tlakového napětí.

U materiálu GOST 08CH18N10T došlo u sérií vzorků 8 a 7 k nejvyššímu navýšení životnosti na hladině $\sigma_{max} = 320$ MPa a zatěžujícím poměru R 0,1. Navýšení počtu cyklů do lomu bylo až trojnásobné. Problém zde byl ve vysokém rozptylu počtu cyklů do lomu, kde průměrná hodnota u série 8 byla 485560 cyklů a SMODCH ± 344386 cyklů. U série 7 byl rozptyl hodnot podstatně nižší. Mikročistota a další heterogenity v materiálu jsou zanedbatelné.

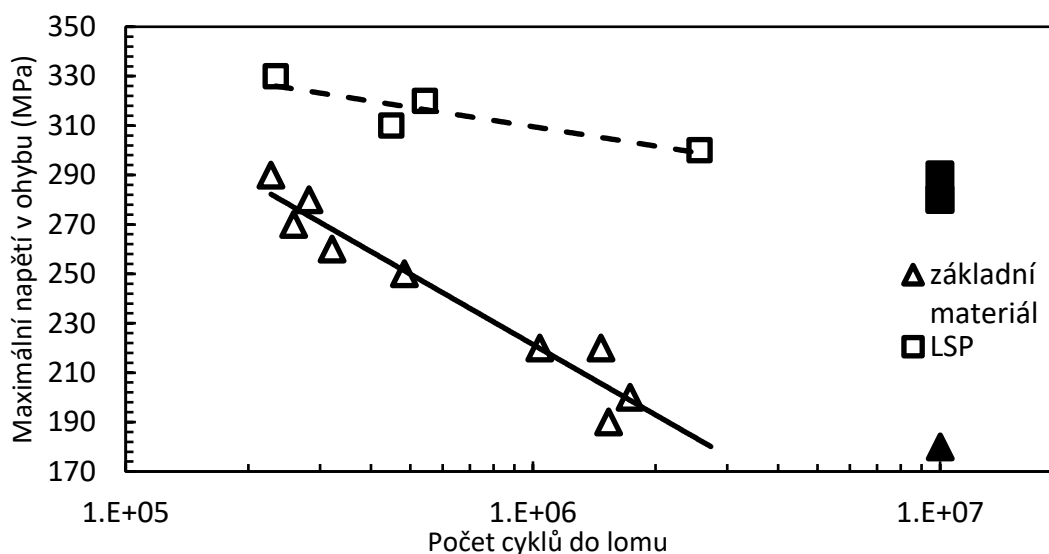
7.5 Ověření vlivu strategie „střelby“ na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost

Z naměřených hodnot zbytkových napětí před a po zpevnění viz Obr. 7.5-1 vyplývá, že zpevněním povrchu metodou LSP došlo ke zvýšení tlakového napětí, a to nejvíce v oblasti pod vrubem, kde působí největší tahové napětí. U dalších měřených míst, které jsou vzdálenější od vrubu, bylo vnesené napětí výrazně nižší. Tento jev byl docílen řízenou distribucí zbytkového napětí.



Obr. 7.5-1 Naměřené hodnoty zbytkového napětí

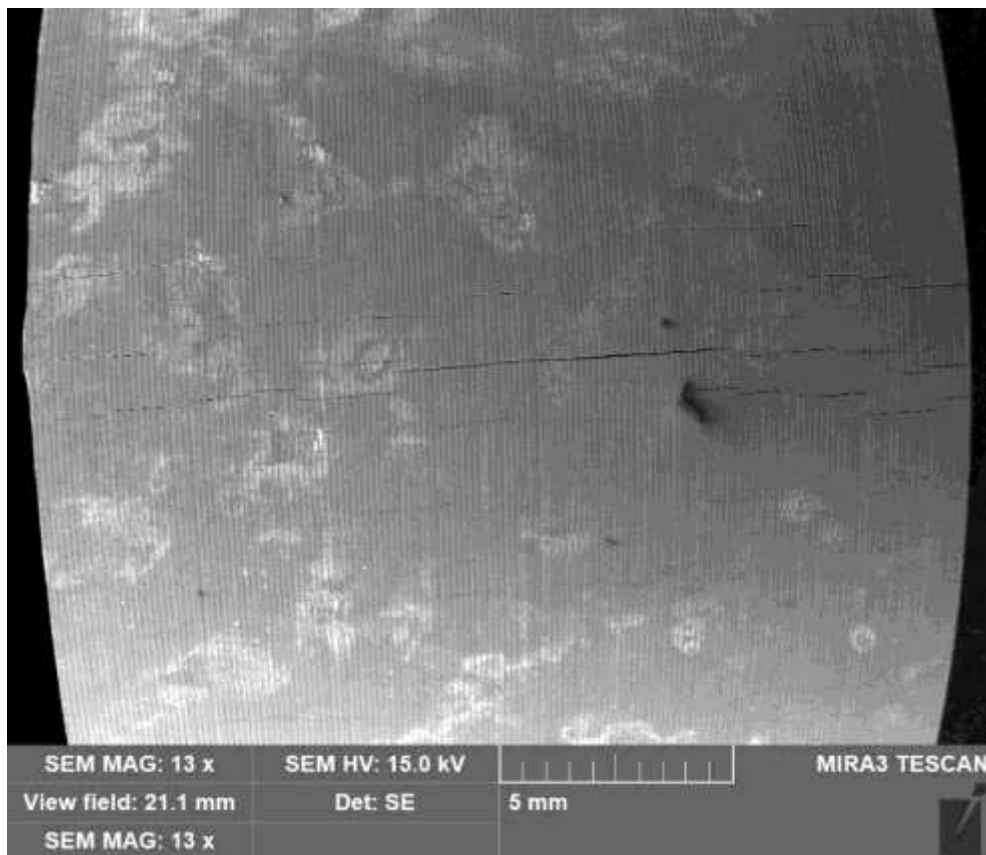
Výsledkem únavových zkoušek materiálu GOST 08CH18N10T ve zpevněném a nezpevněném stavu jsou křivky na Obr. 7.5-2. Z únavových křivek je patrné, že únavová životnost (10^7 cyklů) u zpevněného materiálu je na hodnotě σ_{max} 280 MPa, u nezpevněného materiálu 180 MPa. Zpevněný materiál dosahuje o více jak 50 % vyšší únavovou životnost než nezpevněný.



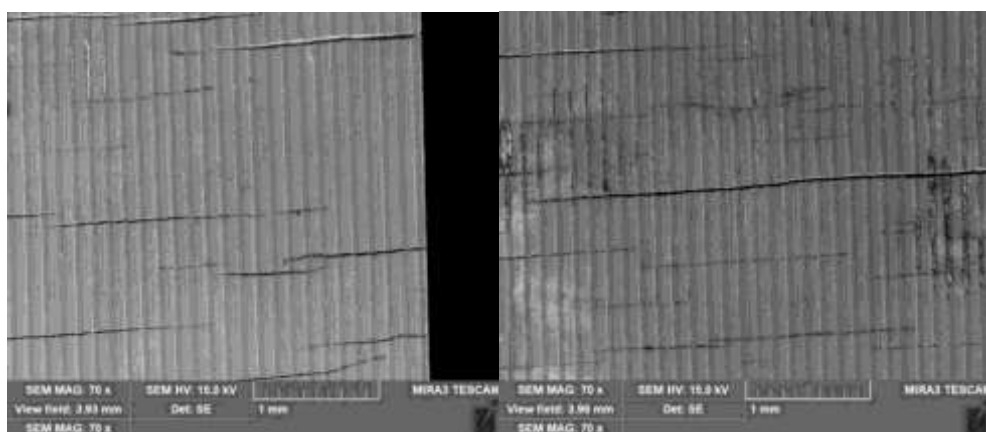
Obr. 7.5-2 Wöhlerova křivka nezpevněných a zpevněných zkušebních těles

7.6 Zkouška korozního praskání v prostředí roztoku chloridu hořečnatého

Z SEM a SM analýz lze konstatovat, že na základním nezpevněném povrchu vzorku byly pozorovány korozní trhliny orientované kolmo na směr tahového namáhání. Trhliny se vyskytovaly v celé délce vzorku již po 2 hodinové expozici, viz Obr. 7.6-1. U zpevněných vzorků nebyly pozorovány po 20hodinové expozici žádné korozní trhliny, viz Obr. 7.6-3 a Obr. 7.6-4.



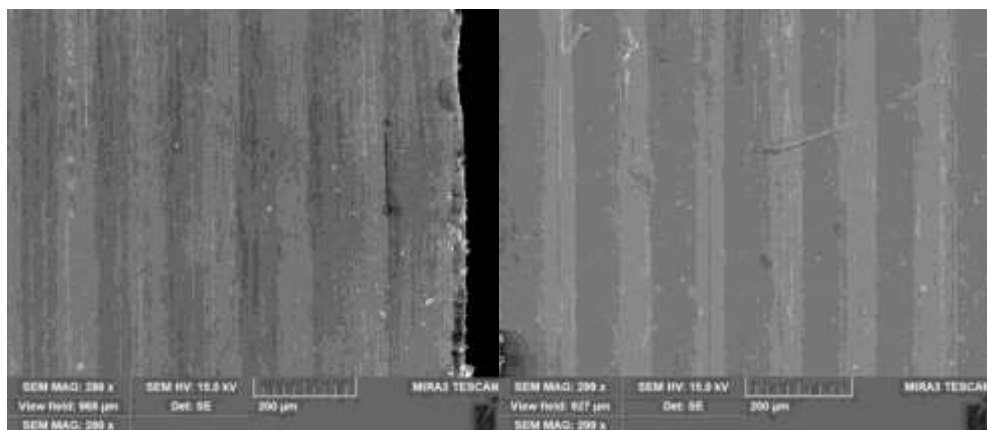
Obr. 7.6-1 Snímek povrchu vzorku po korozní zkoušce – nezpevněný stav



Obr. 7.6-2 Detaily povrchu vzorku po korozní zkoušce – nezpevněný stav



Obr. 7.6-3 Snímek povrchu vzorku po korozní zkoušce – zpevněný stav



Obr. 7.6-4 Detaily povrchu vzorku po korozní zkoušce – zpevněný stav

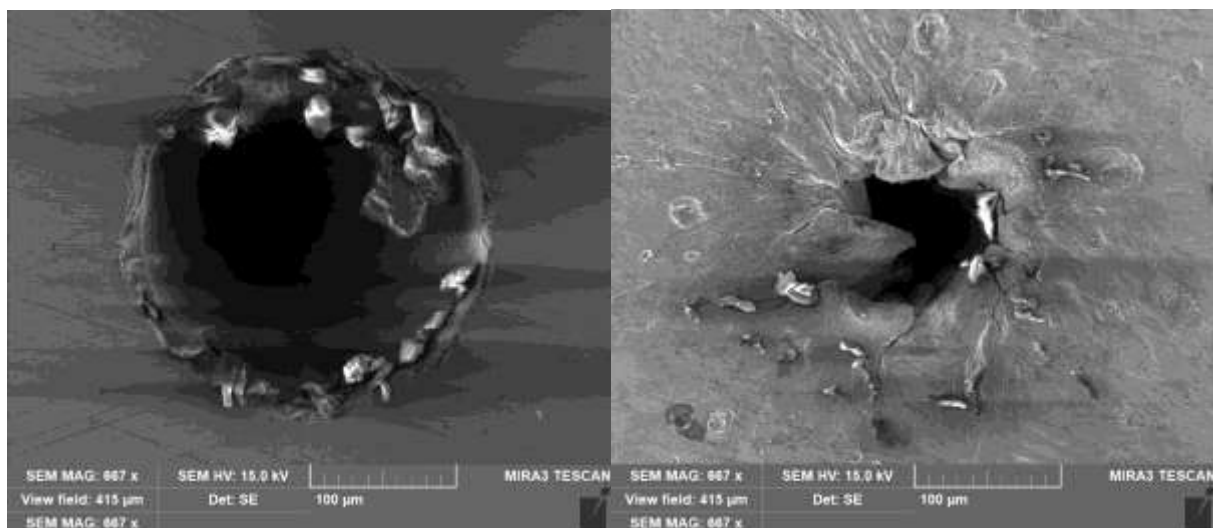
Pro zjištění hloubky korozních trhlin byly provedeny metalografické výbrusy v příčném směru, viz Obr. 7.6-5. Naměřená délka trhlin byla od 0,1 do 0,5 mm.



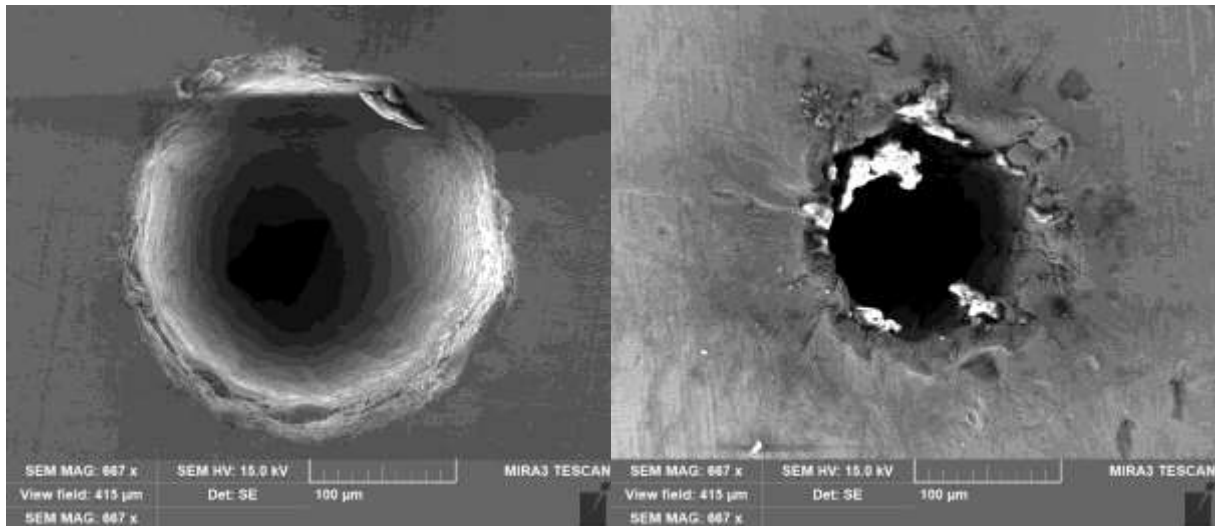
Obr. 7.6-5 Příčný výbrus vzorků (nezpevněný stav) – leštěný (vlevo) a leptaný (vpravo)

7.7 Zkouška VCÚ s uměle vyrobeným korozním bodem

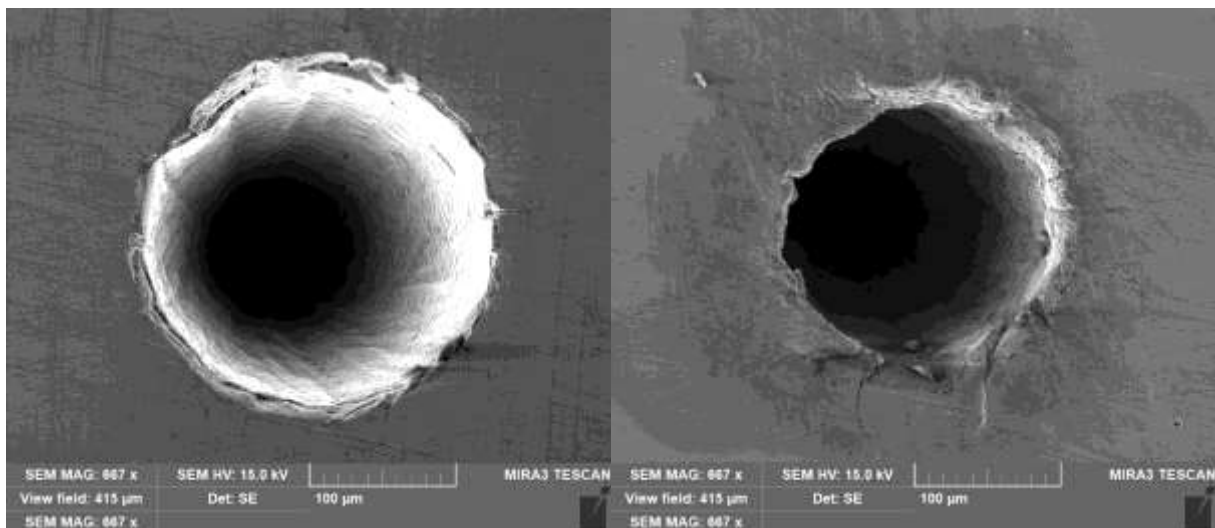
Výsledky z vyhodnocení optimálního nastavení LSP procesu na vzorcích s vrubem jsou uvedeny na Obr. 7.7-1 až Obr. 7.7-3. Z pozorování povrchu v místě vrubu před a po LSP vyplývá, že u varianty LSP 1 byl pozorován značně zdeformovaný povrch v místě vrubu s výskytem trhlin s délkou přes 100 μm . U varianty LSP 2 byla pozorována menší deformace v oblasti hrany vrubu s výskytem trhlin do délky 25 μm . Varianta LSP 3 vykazovala nejmenší deformace z analyzovaných vrubů s přítomností krátkých trhlin do 35 μm . Na základě topografické analýzy byly vybrány varianty LSP1 a LSP2 pro zpevnění zkušebních těles na VCÚ.



Obr. 7.7-1 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) - varianta LSP 3

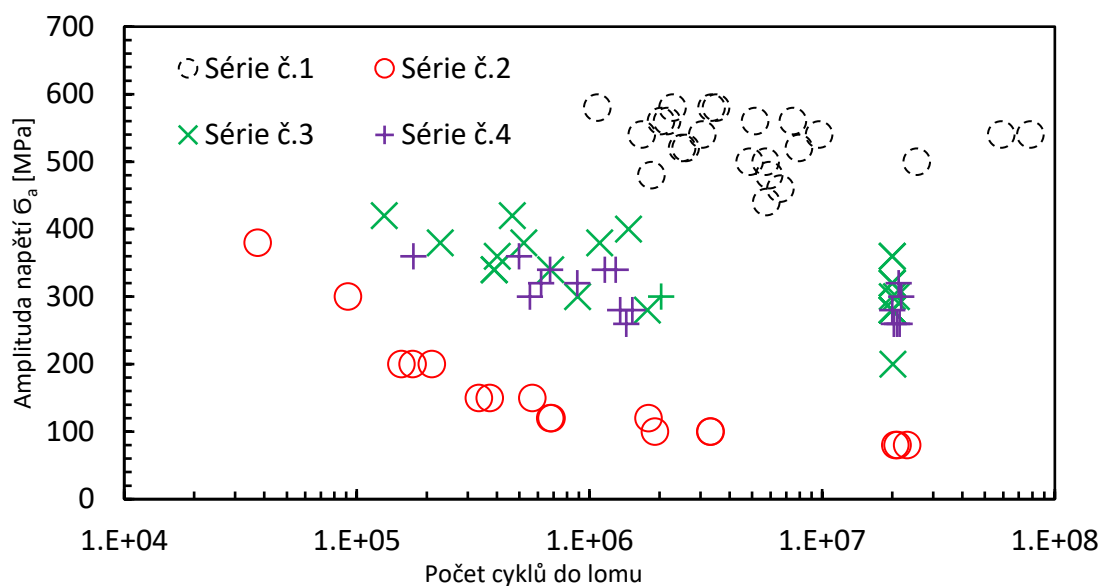


Obr. 7.7-2 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) – varianta LSP 2



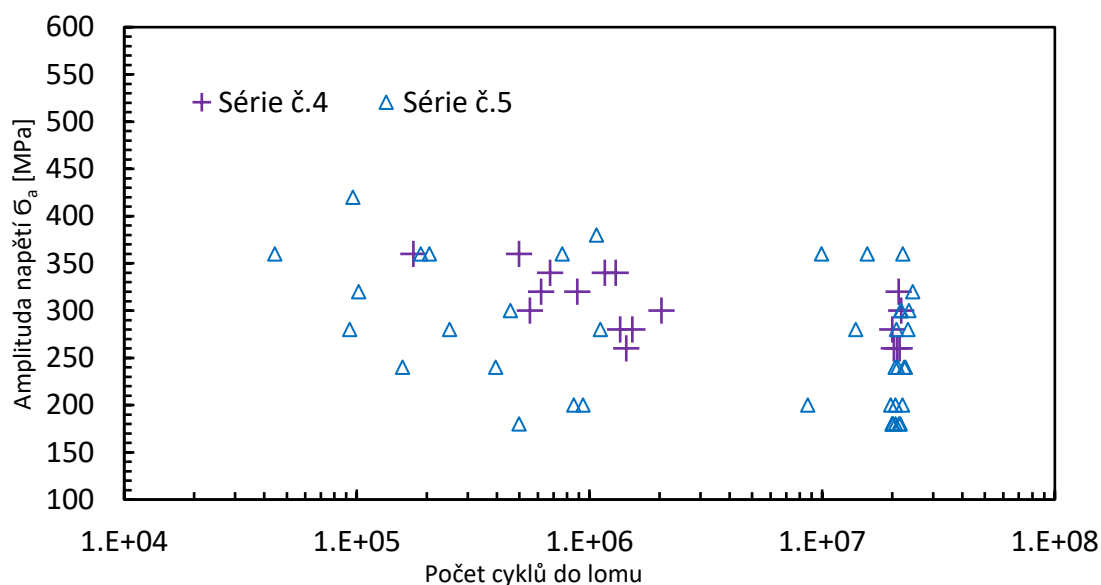
Obr. 7.7-3 Oblast vrubu před (vlevo) a po LSP (vpravo) – varianta LSP 1

Výsledky ze zkoušek VCÚ ve formě Wöhlerových křivek jsou uvedeny na Obr. 7.7-4 a Obr. 7.7-5. Měřením na sérii č.1 zkušebních těles bez vad byla stanovena mez únavy oceli Böhler T552 $\sigma_c = 380$ MPa. Umělé vady u série č.2 měly za následek výrazné snížení únavové pevnosti – mez únavy klesla na cca 80 MPa. Zpevnění povrchu technologií LSP1 na zkušebních tělesech série č.3 s vadami, vedla k výraznému zvýšení únavové pevnosti $\sigma_c = 240$ MPa, pro variantu LSP2 byla stanovena mez únavy $\sigma_c = 260$ MPa.



Obr. 7.7-4 Wöhlerovy křivky jednotlivých sérií na vzduchu

Výsledky z měření VCÚ v prostředí vodního kondenzátu jsou na Obr. 7.7-5. Z Obr. 7.7-5 je patrné, že hodnota únavové pevnosti v parním kondenzátu je v průměru o 100 MPa nižší než na vzduchu, ale především byl zjištěn větší rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 7.7-5 Wöhlerovy křivky sérií č. 4 (vzduch) a č. 5 (parní kondenzát)

7.8 Fraktografická expertíza lomových ploch zkušebních těles s vruby po VCÚ

Po zkouškách VCÚ byly provedeny fraktografické analýzy lomových ploch zkušebních těles. Výsledky fraktografií lomových ploch jsou uvedeny v následujících kapitolách.

7.8.1 Fraktografické hodnocení série č.1 – hladká zkušební tělesa bez vrubu na vzduchu

Charakter LP zkušebních těles po cyklických zkouškách vykazoval odlišný vzhled, který byl zapříčiněn zejména místem iniciace trhliny. Vliv na místo iniciace trhliny měla především přítomnost komplexních vměstků, které byly rovnoměrně distribuovány v celém objemu materiálu. Poloha ohniska únavové trhliny byla zejména závislá na přítomnosti vměstku, který působil v daném zkušebním tělese jako nejkritičtější iniciátor napětí. Ohnisko šíření únavové trhliny bylo často pod povrchem zkušebního tělesa, a to zejména při nižších amplitudách zatížení. Pro podrobnější fraktografický rozbor byly vybrány vzorky z horní a spodní hladiny amplitudy zatěžování σ_a 540 MPa (zkušební těleso Z19) a 420 MPa (zkušební těleso Z32). U přetržených vzorků s počtem cyklů nad 5×10^6 cyklů byla zjištěna pouze podpovrchová iniciace únavové trhliny z dominantního komplexního vměstku. Podpovrchová iniciace vytvářela na LP tzv. fish-eye efekt, kde uprostřed kruhové lesklé oblasti se nacházelo ohnisko únavové trhliny.

Tab. 7-5 Výsledky zkoušek VCÚ na hladkých tělesech bez vrubu na vzduchu

| Série č.1 | σ_a [MPa] | $N_{celkový}$ | Lom | Série č.1 | σ_a [MPa] | $N_{celkový}$ | Lom |
|-----------|---------------------|---------------|-------|-----------|---------------------|---------------|-------|
| Z1 | 400 | 3,28E+08 | Výdrž | Z21 | 560 | 2,03E+06 | LOM |
| Z2 | 460 | 1,36E+08 | LOM | Z22 | 540 | 9,72E+06 | LOM |
| Z3 | 460 | 3,28E+08 | VÝDRŽ | Z23 | 560 | 7,49E+06 | LOM |
| Z4 | 460 | 6,62E+06 | LOM | Z24 | 560 | 5,15E+06 | LOM |
| Z5 | 480 | 1,85E+06 | LOM | Z25 | 580 | 3,35E+06 | LOM |
| Z6 | 480 | 4,20E+08 | LOM | Z26 | 580 | 3,50E+06 | LOM |
| Z7 | 480 | 5,94E+06 | VÝDRŽ | Z27 | 580 | 2,28E+06 | LOM |
| Z8 | 480 | 3,01E+08 | VÝDRŽ | Z28 | 580 | 1,08E+06 | LOM |
| Z9 | 480 | 3,28E+08 | LOM | Z29 | 420 | 5,06E+08 | VÝDRŽ |
| Z10 | 520 | 2,50E+06 | LOM | Z30 | 420 | 5,19E+08 | VÝDRŽ |
| Z11 | 440 | 3,19E+08 | VÝDRŽ | Z31 | 420 | 4,99E+08 | LOM |
| Z12 | 440 | 1,01E+08 | LOM | Z32 | 400 | 3,01E+08 | LOM |
| Z13 | 440 | 5,76E+06 | LOM | Z33 | 380 | 1,00E+09 | VÝDRŽ |
| Z14 | 440 | 3,31E+08 | VÝDRŽ | Z34 | 380 | 1,00E+09 | VÝDRŽ |
| Z15 | 420 | 5,43E+08 | VÝDRŽ | Z35 | 500 | 4,88E+06 | LOM |
| Z16 | 540 | 5,89E+07 | LOM | Z36 | 500 | 5,73E+06 | LOM |
| Z17 | 540 | 7,86E+07 | LOM | Z37 | 500 | 2,55E+07 | LOM |
| Z18 | 540 | 1,68E+06 | LOM | Z38 | 520 | 1,17E+08 | LOM |
| Z19 | 540 | 3,05E+06 | LOM | Z39 | 520 | 7,95E+06 | LOM |
| Z20 | 560 | 2,15E+06 | LOM | Z40 | 520 | 2,59E+06 | LOM |

Fraktografie zkušební tělesa Z19

Zkušební těleso (ZT) Z19 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 540 MPa a počtem cyklů do lomu 168 195. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.3-1 a Obr. 12.3-2). Únavová trhlinka vychází z komplexního vměstku o velikosti cca 25 μm , který zasahuje až na povrch válcové plochy ZT. Trhlinka se šířila v ploše kolmé k podélné ose ZT do hloubky 1,2 mm, v níž šíření trhlinky přešlo do urychleného rozvoje. Urychlená část rozvoje trhlinky tvoří pás o šířce 0,5 mm. Trhlinka dále mění směr a stáčí se pod úhlem 38° k podélné ose ZT až do dolomení. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.3-3 a Obr. 12.3-11). Celkový podíl únavové trhlinky je 19 % z celkové LP (průřezu ZT). Kulovitý vměstek v ohnisku, který je kompaktního charakteru, zřejmě zapříčinil rozvoj únavové trhlinky. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlinka se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. První náznaky striačních linií jsou pozorovány v hloubce 0,38 mm s roztečí cca 0,2 μm (Obr. 12.3-7). Výraznější striační linie lze pozorovat zhruba 0,75 mm od ohniska, kde délka rozteče je 0,6 – 0,7 μm (Obr. 12.3-8). Se vzrůstající hloubkou trhlinky se typ transkrystalického šíření trhlinky nemění, pouze se mění vzhled LP, kdy se rozteč striačních linií s hloubkou zvyšuje a striační linie jsou lépe pozorovatelné. Ve vzdálenosti 0,89 mm od ohniska je rozteč striačních linií v rozmezí 0,4 - 0,8 μm . Ve vzdálenosti 1,32 mm od ohniska 0,9-1,2 μm . Hranice mezi plochou únavové trhlinky a dolomu je ve vzdálenosti cca. 1,8 mm, kdy se charakter LP zásadně mění. Z transkrystalického zrychleného šíření trhlinky dochází k výrazné makroskopické deformaci tvárným usmýknutím. Na LP dolomu jsou patrné výrazné jamky (Obr. 12.3-11).

Fraktografie zkušební tělesa Z32

Zkušební těleso Z32 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 420 MPa a počtem cyklů do lomu 49 886 158. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se pod povrchem v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.4-2). Únavová trhlinka vychází ze středu kruhové plochy o průměru 2,8 mm (Obr. 12.4-3). Kruhová plocha zasahuje až k povrchu a vytváří Fish-eye efekt. Trhlinka se šířila radiálně od ohniska do hloubky 1,25 mm, v níž šíření trhlinky přešlo do urychleného rozvoje. Únavová trhlinka vytvářela LP kolmou na osu zatěžování. Urychlená část rozvoje trhlinky sahá do hloubky 1,4 mm od ohniska. Trhlinka dále mění směr a stáčí se pod úhlem 43° k podélné ose ZT až do dolomení. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.4-1 a Obr. 12.4-2). Celkový podíl únavové trhlinky je 35 % z celkové LP (průřezu ZT). Únavová trhlinka se zřejmě iniciovala z kulovitého vměstku o průměru 36 μm . Na Obr. 12.4-4 je patrná dutina po vměstku, který se nachází na protikusku ZT. Charakter LP se s hloubkou od ohniska mění a jemné žebrování hrubne a odráží martenzitickou strukturu (Obr. 12.4-5). Únavová trhlinka se šíří pouze transkrystalicky a kolmo k ose zatěžování. Transkrystalické porušování vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním (Obr. 12.4-6). První náznaky striačních linií jsou pozorovány v hloubce 0,31 mm od ohniska s roztečí cca 0,16 μm (Obr. 12.4-5). Výraznější striační linie lze pozorovat v hloubce 0,78 mm od ohniska, kde délka rozteče je 0,3 – 0,5 μm (Obr. 12.4-6). Se vzrůstající se hloubkou trhlinky se typ transkrystalického šíření trhlinky nemění, pouze se mění vzhled LP, kdy se rozteč striačních linií s hloubkou zvyšuje a striační linie jsou lépe pozorovatelné. Ve vzdálenosti 1,19 mm od ohniska je rozteč striačních linií v rozmezí 0,3-0,7 μm . Hranice mezi plochou

únavové trhliny a dolomu je ve vzdálenosti cca 1,4 mm, kdy se charakter LP zásadně mění. Z transkrystalického zrychleného šíření trhliny dochází k výrazné makroskopické deformaci tvárným usmýknutím. Na LP dolomu jsou patrné výrazné jamky (Obr. 12.4-9). Byla provedena fraktografie lomový ploch zlomených zkušebních těles, která byla namáhána cyklickým napětím. Statická složka namáhání byla 300 MPa, dynamická složka od 380 do 580 MPa. Zkoušky probíhaly na vzduchu za pokojové teploty 21 ± 2 °C. Mez únavy byla určena na 380 MPa. Z Wöhlerovy křivky viz Obr. 7.7-5 je patrný velký rozptyl hodnot zátěžných cyklů. Například na hladině 480 MPa se lišila únavová životnost o více jak 32×10^6 cyklů. Tento rozptyl byl způsoben především vysokým obsahem vměstků v celém objemu materiálu a odlišným způsobem šíření trhliny. Charakter porušování zkušebních těles na horní a dolní hladině dynamického zatěžování ZT se lišil v poloze ohniska, kde na vyšších hladinách amplitudy napětí docházelo především k povrchové iniciaci trhliny a na nižších k podpovrchové iniciaci. Únavová trhlina se prioritně šířila transkrystalicky a odrážela charakter struktury materiálu. LP trhliny tvořila kombinaci únavových striací a transkrystalického štěpení/kvazištěpení. LP se lišily ve velikosti únavové trhliny a v místě iniciace, kde zásadní vliv na iniciaci mělo rozmístění dominantních komplexních vměstků. Charakter LP v závislosti na vzdálenosti od ohniska únavové trhliny se lišil zejména v odlišných roztečích striačních linií, které byly pozorovatelné cca. 0,5 mm od ohniska až k dolomu. Výrazná změna velikosti rozteči striačních linií byla pozorována těsně před hranicí dolomu cca. 0,5 mm.

7.8.2 Fraktografické hodnocení série č.2 –zkušební tělesa s uměle vyrobeným defektem na vzduchu

Charakter LP zkušebních těles po cyklických zkouškách vykazoval podobný vzhled. Trhlina se ve všech zkušebních tělesech začala iniciovat v místě umělého vrubu, konkrétně pak z boku a hrany vrubu. Tvar a velikost uměle vyrobeného vrubu způsobil vysoký pokles únavové pevnosti na hodnotu 80 MPa při stejném předpětí 300 MPa jako v předchozích zkouškách VCÚ. Naměřené hodnoty VCÚ s následným vyhodnocením velikosti vrubu, délky únavové trhliny a velikosti únavové plochy jsou uvedeny v Tab. 7-6. Pro podrobnější fraktografický rozbor byly vybrány vzorky z horní a spodní hladiny amplitudy zatěžování σ_a 200 MPa (zkušební těleso 3) a 100 MPa (zkušební těleso 6).

Tab. 7-6 Naměřené hodnoty po VCÚ pro jednotlivá zkušební tělesa serie č.2

| Série č.2 | σ_a [MPa] | $N_{\text{celkový}}$ | Lom | Průměr vrubu [μm] | Hloubka vrubu [μm] | Velikost únavové plochy [μm^2] | Délka trhliny [μm] |
|-----------|---------------------|----------------------|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 2 | 300 | 9,18E+04 | LOM | 240 | 443 | 10.186.836 | 3106 |
| 3 | 200 | 1,55E+05 | LOM | 247 | 481 | 11.271.020 | 3087 |
| 4 | 150 | 3,73E+05 | LOM | 280 | 503 | 11.659.656 | 3110 |
| 5 | 150 | 5,68E+05 | LOM | 242 | 443 | 11.897.460 | 3225 |
| 6 | 100 | 3,31E+06 | LOM | 240 | 461 | 13.061.257 | 3275 |
| 7 | 80 | 2,06E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 8 | 80 | 2,11E+07 | VÝDRŽ | | | | |

| | | | | | | | |
|----|-----|----------|-------|-----|-----|------------|-------|
| 9 | 150 | 3,34E+05 | LOM | 250 | 444 | 11.870.120 | 3114 |
| 10 | 120 | 6,87E+05 | LOM | 250 | 367 | 13.319.087 | 3288 |
| 11 | 100 | 3,32E+06 | LOM | 247 | 438 | 13.360.244 | 3311 |
| 12 | 120 | 6,78E+05 | LOM | 265 | 455 | 12.446.497 | 3241 |
| 13 | 100 | 1,92E+06 | LOM | 243 | 447 | 13.329.376 | 3,325 |
| 14 | 80 | 2,32E+07 | VÝDRŽ | | | | |

Fraktografie zkušební tělesa 3

Zkušební těleso 3 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 200 MPa a počtem cyklů do lomu 155 441. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.5-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 247 μm a hloubce 481 μm . Trhlinka se šířila v ploše kolmo od boku vrubu do hloubky 3,09 mm. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.5-2 a Obr. 12.5-3). Plocha únavové trhliny je $11,3 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$.

Únavová plocha trhliny kopíruje obvod ZT do úhlu cca 170°. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlinka se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,8 mm s roztečí cca 0,4 μm (Obr. 12.5-9). Dolom ZT je zcela tvárný tvořený důlky.

Fraktografie zkušební tělesa 6

Zkušební těleso 6 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 100 MPa a počtem cyklů do lomu 3 312 671. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.6-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 240 μm a hloubce 461 μm . Trhlinka se šířila v ploše kolmo od boku vrubu do hloubky 3,2 mm. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.6-2 až Obr. 12.6-4). Plocha únavové trhliny je $13 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$. Únavová plocha trhliny kopíruje obvod ZT do úhlu cca 120°. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlinka se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. S větší vzdáleností od ohniska jsou pozorovány ostrůvky interkrystalických fazet. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,5 mm s roztečí cca 0,3 μm (Obr. 12.6-9). Dolom ZT je zcela tvárný, tvořený důlky. Z fraktografických analýz vzorků série č. 2 vyplývá, že přítomnost kuželového vrubu měla za následek šíření únavových trhlin při nižších hodnotách dynamického zatížení. Trhlinka se iniciovala z boku a hrany vrubu a šířila se po povrchu zkušební tělesa.

7.8.3 Fraktografické hodnocení série č.3 –zkušební tělesa s uměle vyrobeným defektem na vzduchu se zpevněným povrchem LSP1

Charakter LP zkušebních těles po cyklických zkouškách vykazoval odlišný vzhled ve srovnání se sérií č.2. Trhlinka se ve zkušebních tělesech začala iniciovat v místě umělého vrubu, konkrétně pak z boku vrubu. Zpevnění povrchové vrstvy v místě vrubu způsobilo nárůst

únavové pevnosti na hodnotu 240 MPa při stejném předpětí 300 MPa jako v předchozí sérii č.2. Naměřené hodnoty VCÚ s následným vyhodnocení velikosti vrubu, délky únavové trhliny a velikosti únavové plochy jsou uvedeny v Tab. 7-7. Pro podrobnější fraktografický rozbor byly vybrány vzorky z horní a spodní hladiny amplitudy zatěžování σ_a 340 MPa (zkušební těleso 23) a 300 MPa (zkušební těleso 25).

Tab. 7-7 Naměřené hodnoty po VCÚ pro jednotlivá zkušební tělesa série č.3

| Série č.3 | σ_a [MPa] | $N_{celkový}$ | Lom | Průměr vrubu [μm] | Hloubka vrubu [μm] | Velikost únavové plochy [μm^2] | Délka trhliny [μm] |
|-----------|---------------------|---------------|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 20 | 300 | 2,09E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 21 | 360 | 4,02E+05 | LOM | 155 | 570 | 6.678.817 | |
| 22 | 200 | 2,01E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 23 | 340 | 3,89E+05 | LOM | 190 | 577 | 7.880.420 | 3112 |
| 24 | 300 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 25 | 300 | 8,89E+05 | LOM | 192 | 619 | 7.729.613 | 3119 |
| 26 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 27 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 28 | 280 | 1,77E+06 | LOM | 190 | 570 | 8.462.315 | 3222 |
| 29 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 30 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 31 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 22_1 | 420 | 1,31E+05 | LOM | 186 | 638 | 7.939.382 | |
| 20_1 | 420 | 4,66E+05 | LOM | 151 | 544 | 7.043.078 | |
| 24_1 | 320 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 26_1 | 320 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 27_1 | 320 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 29_1 | 340 | 3,89E+05 | LOM | 160 | 575 | 6.553.530 | 2683 |
| 30_1 | 340 | 6,80E+05 | LOM | 152 | 596 | 7.942.355 | 3052 |
| 31_1 | 360 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 24_2 | 360 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| 26_2 | 380 | 2,28E+05 | LOM | 151 | 617 | 7.247.380 | 3111 |
| 27_2 | 380 | 1,11E+06 | LOM | 200 | 573 | 7.517.844 | 3312 |
| 31_2 | 380 | 5,23E+05 | LOM | 180 | 580 | 7.536.752 | 2870 |
| 24_3 | 400 | 1,47E+06 | LOM | 160 | 615 | 7.073.458 | 3003 |

Fraktografie zkušební tělesa 23

Zkušební těleso 23 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 340 MPa a počtem cyklů do lomu 155 441. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.7-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 190 μm a hloubce 577 μm . Naměřený průměr vrubu je menší z důvodu plastického zdeformování po LSP. Větší hloubka vrubu byla způsobena nepřesným laserovým vrtáním. Trhlinka se šířila v ploše kolmo od boku vrubu do hloubky 3,1 mm. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.7-1 a Obr. 12.7-2). Plocha únavové trhliny je $7,8 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$.

Únavová plocha trhliny kopíruje pouze z části obvod ZT do úhlu cca 50° (Obr. 12.7-4). Zpevněný povrch v blízkosti vrubu potlačuje šíření trhliny po obvodu ZT. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlinka se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,5 mm s roztečí cca 0,5 μm (Obr. 12.7-9). Dolom je ZT je zcela tvárný tvořený důlky.

Fraktografie zkušební tělesa 25

Zkušební těleso 25 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 300 MPa a počtem cyklů do lomu 889 258. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.8-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 192 μm a hloubky 619 μm . Naměřený průměr vrubu je menší z důvodu plastického zdeformování po LSP. Větší hloubka vrubu byla způsobena nepřesným laserovým vrtáním. Trhlinka se šířila v ploše kolmo od boku vrubu do hloubky 3,12 mm. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.8-2 až Obr. 12.8-4). Plocha únavové trhliny je $7,7 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$.

Únavová plocha trhliny kopíruje pouze z části obvod ZT do úhlu cca 80°. Zpevněný povrch v blízkosti vrubu potlačuje šíření trhliny po obvodu ZT. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlinka se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,84 mm s roztečí cca 0,18 μm (Obr. 12.8-9). Dolom ZT je zcela tvárný, tvořený důlky.

Z fraktografických analýz série vzorků č. 3 vyplývá, že zpevněním uměle vyrobeného vrubu bylo potlačeno šíření únavové trhliny po povrchu ZT.

7.8.4 Fraktografické hodnocení série č.4 –zkušební tělesa s uměle vyrobeným defektem na vzduchu se zpevněným povrchem LSP2

Charakter LP zkušebních těles po cyklických zkouškách vykazoval obdobný vzhled ve srovnání se sérií č.3. Trhlinka se ve zkušebních tělesech začala iniciovat v místě umělého vrubu, konkrétně pak z boku vrubu. Zpevnění povrchové vrstvy v místě vrubu způsobilo zvýšení únavové pevnosti na hodnotu 260 MPa při stejném předpětí 300 MPa jako v předchozích zkouškách série č. 2 a 3. Naměřené hodnoty VCÚ s následným vyhodnocení velikosti vrubu a velikosti únavové plochy jsou uvedeny v Tab. 7-8.

Pro podrobnější fraktografický rozbor byly vybrány vzorky z horní a spodní hladiny amplitudy zatěžování σ_a 320 MPa (zkušební těleso 42) a 280 MPa (zkušební těleso 47).

Tab. 7-8 Naměřené hodnoty po VCÚ pro jednotlivá zkušební tělesa série č.4

| Série č.4 | σ_a [MPa] | $N_{\text{celkový}}$ | Lom | Průměr vrubu [μm] | Hloubka vrubu [μm] | Velikost únavové plochy [μm^2] |
|-----------|---------------------|----------------------|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 40 | 360 | 4,98E+05 | LOM | 155 | 544 | 6.877.808 |
| 41 | 360 | 1,75E+05 | LOM | 160 | 582 | 7.157.231 |
| 42 | 320 | 8,86E+05 | LOM | 165 | 570 | 7.642.880 |
| 43 | 320 | 2,13E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 44 | 320 | 6,19E+05 | LOM | 159 | 604 | 8.549.873 |
| 45 | 280 | 1,36E+06 | LOM | 175 | 602 | 7.860.085 |
| 46 | 280 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 47 | 280 | 1,53E+06 | LOM | 170 | 575 | 8.187.329 |
| 48 | 260 | 2,15E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 49 | 260 | 2,03E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 50 | 260 | 1,44E+06 | LOM | 160 | 571 | 8.849.375 |
| 51 | 260 | 2,10E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 43_1 | 300 | 2,04E+06 | LOM | 155 | 583 | 7.801.213 |
| 46_1 | 300 | 2,19E+07 | VÝDRŽ | | | |
| 48_1 | 300 | 5,55E+05 | LOM | 177 | 580 | 7.613.561 |
| 49_1 | 340 | 1,16E+06 | LOM | 152 | 590 | 7.901.252 |
| 51_1 | 340 | 6,77E+05 | LOM | 150 | 587 | 7.493.654 |
| 46_2 | 340 | 1,29E+06 | LOM | 160 | 610 | 7.625.132 |

Fraktografie zkušební tělesa 42

Zkušební těleso 42 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa a dynamickou složkou napětí o hodnotě 320 MPa a s počtem cyklů do lomu 886 009. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.9-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 165 μm a hloubky 570 μm . Naměřený průměr vrubu je menší z důvodu plastického zdeformování po LSP. Větší hloubka vrubu byla způsobena nepřesným laserovým vrtáním. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.9-2 až Obr. 12.9-4). Plocha únavové trhliny je $7,64 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$.

Únavová plocha trhliny kopíruje pouze z části obvod ZT do úhlu cca 70° (Obr. 12.9-4) a vykazuje nesymetrii vůči umělému vrubu. Zpevněný povrch v blízkosti vrubu potlačuje šíření

trhliny po obvodu ZT. Hrana vrubu je plasticky zdeformována po LSP, viz Obr. 12.9-6. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží martenzitickou strukturu. Únavová trhlina se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,7 mm s roztečí cca 0,3 μm (Obr. 12.9-9). Dolom je ZT je zcela tvárný tvořený důlky.

Fraktografie zkušební tělesa 47

Zkušební těleso 47 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 280 MPa a s počtem cyklů do lomu 1 528 022. Na ZT vznikla jediná únavová trhlina nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.10-1). Únavová trhlina vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 170 μm a hloubky 575 μm . Naměřený průměr vrubu je menší z důvodu plastického zdeformování po LSP. Větší hloubka vrubu byla způsobena nepřesným laserovým vrtáním. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.10-4). Plocha únavové trhliny je $8,2 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$.

Únavová plocha trhliny kopíruje pouze z části obvod ZT do úhlu cca 30° (Obr. 12.10-2). Zpevněný povrch v blízkosti vrubu potlačuje šíření trhliny po obvodu ZT. Únavová trhlina se šíří výhradně transkrystalicky a vytváří pseudo-štěpné fasety uspořádáním. Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 0,95 mm s roztečí cca 0,15 μm (Obr. 12.10-9). Dolom je ZT je zcela tvárný, tvořený důlky.

Z fraktografických analýz série vzorků č. 4 vyplývá, že zpevněním uměle vyrobeného vrubu bylo potlačeno šíření únavové trhliny po povrchu ZT jako u série č.3. Únavová trhlina vykazovala u ZT vyšší asymetrii vůči vrubu.

7.8.5 Fraktografické hodnocení série č.5 –zkušební tělesa s uměle vyrobeným defektem v parním kondenzátu se zpevněným povrchem LSP2

Charakter LP zkušebních těles po cyklických zkouškách vykazoval odlišný vzhled oproti předchozím sériím č.1 až 4 a to z důvodu zkoušení v parním kondenzátu při teplotě 100 °C. Trhlina se ve zkušebních tělesech začala iniciovat prioritně v místě umělého vrubu, konkrétně pak z boku vrubu. Zpevnění povrchové vrstvy v místě vrubu způsobilo pokles únavové pevnosti ve srovnání se sériemi č.3 a č.4 na hodnotu 180 MPa při stejném předpětí 300 MPa, ale nárůst únavové pevnosti ve srovnání se sérií č. 2. Pokles únavové pevnosti v prostředí parního kondenzátu při teplotě 100 °C o 100 MPa oproti zkouškám na vzduchu při 22 °C je obvyklý, viz výzkumná zpráva [31]. Naměřené hodnoty VCÚ s následným vyhodnocení velikosti vrubu a velikosti únavové plochy jsou uvedeny v Tab. 7-9.

Pro podrobnější fraktografický rozbor byly vybrány vzorky z dolní a horní amplitudy zatěžování σ_a 200 MPa (zkušební těleso B1) a 280 MPa (zkušební těleso B7).

Tab. 7-9 Naměřené hodnoty po VCÚ pro jednotlivá zkušební tělesa série č.5

| Série č.5 | σ_a [MPa] | $N_{celkový}$ | Lom | Průměr vrubu [μm] | Hloubka vrubu [μm] | Velikost únavové plochy [μm^2] | Délka trhliny [μm] |
|-----------|---------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| B1 | 200 | 9,37E+05 | LOM | 200 | 662 | 10.138.616 | 257 |
| B2 | 200 | 2,07E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B3 | 200 | 1,97E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B4 | 280 | 2,33E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B5 | 360 | 4,44E+04 | LOM | 211 | 655 | 7.963.101 | 211 |
| B6 | 320 | 1,02E+05 | LOM | 217 | 726 | 7.987.011 | 217 |
| B7 | 280 | 9,30E+04 | LOM | 183 | 682 | 8.838.707 | 183 |
| B8 | 200 | 2,21E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B9 | 200 | 8,55E+05 | LOM | 217 | 755 | 9.859.801 | 217 |
| B10 | 180 | 2,17E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B11 | 180 | 2,14E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B12 | 180 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B13 | 180 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B14 | 180 | 2,00E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B15 | 180 | 4,97E+05 | LOM | 235 | 714 | 11.498.789 | 235 |
| B16 | 180 | 2,07E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B17 | 180 | 2,01E+07 | VÝDRŽ | | | | |
| B18 | 200 | 8,66E+06 | LOM mimo díru | | | 10.684.597 | |
| B19 | 240 | 1,57E+05 | LOM | 204 | 691 | 9.530.336 | 204 |

Fraktografie zkušební tělesa B1

Zkušební těleso B1 bylo namáháno statickým napětím o hodnotě 300 MPa, dynamickou složkou napětí o hodnotě 200 MPa a počtem cyklů do lomu 937 064. Na ZT vznikla jediná únavová trhlinka nacházející se v nejužším místě hyperboloidní plochy (Obr. 12.11-1). Únavová trhlinka vychází z hrany a boku uměle vyrobeného vrubu o průměru 200 μm a hloubky 62 μm . Větší hloubka vrubu byla způsobena nepřesným laserovým vrtáním. Dolomení bylo způsobeno mechanismem tvárného usmýknutí s výraznou makro plastickou deformací (Obr. 12.11-2). Plocha únavové trhliny je $7,64 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2$ a délka 257 μm .

Únavová plocha trhliny kopíruje pouze z části obvod ZT do úhlu cca 90° (Obr. 12.11-2) a vykazuje nesymetrii vůči umělému vrubu. Zpevněný povrch v blízkosti vrubu potlačuje šíření trhliny po obvodu ZT. V blízkosti vrubu se nachází korozní produkty a interkrystalické fazety. LP bezprostředně u ohniska vykazuje hrubý charakter (žebrovitá struktura), který odráží

martenzitickou strukturu. Únavová trhлина se šíří transkrystalicky i interkrystalicky (typické pro zkoušky ve vodném prostředí pro tento materiál). Výraznější striační linie jsou pozorovány v hloubce 2,2 mm s roztečí cca 0,7 μm (Obr. 12.11-9). Dolom je ZT je zcela tvárný tvořený důlky. Na povrchu ZT byly pozorovány drobné korozní důlky do 10 μm .

Tab. 7-10 Naměření rozteče striačních linií na LP analyzovaných zkušebních těles

| | Vzorek | Vzdálenost od ohniska [mm] | Rozteč striačních linií [μm] |
|---|--------|----------------------------|---|
| Hladké tělesa | Z19 | 0,75 | 0,6 – 0,7 |
| | Z32 | 0,78 | 0,3 – 0,5 |
| Tělesa s vrubem | 3 | 0,8 | 0,4 |
| | 6 | 0,5 | 0,3 |
| Tělesa s vrubem LSP1 | 23 | 0,5 | 0,5 |
| | 25 | 0,84 | 0,2 |
| Tělesa s vrubem LSP2 | 42 | 0,7 | 0,3 |
| | 47 | 0,95 | 0,2 |
| Tělesa s vrubem LSP2 – parní kondenzát | B1 | 2,2 | 0,7 |
| | B7 | 1,9 | 0,9 |

8 Diskuze výsledků

Literární rešerše předložené disertační práce byla zaměřena především na současné možnosti zpevňování povrchu kovových materiálů prostřednictvím vnášení tlakových napětí. Největší pozornost byla věnována technologií Laser Shock Peening (LSP). Literární rešerše byly zmapovány současné typy technologií umožňující zpevňování povrchu, včetně jejich porovnání. V experimentálním programu byly ověřeny informace z literární rešerše, popsány vlivy LSP technologie na mechanické a fyzikální vlastnosti s ohledem na způsob provedení modifikace povrchu. V experimentálním programu bylo provedeno více jak 50 způsobů zpevnění povrchu dvou materiálů pro mechanické a fyzikální zkoušky. Níže uvedená diskuze výsledků experimentálního programu je zaměřena především na porovnání výsledků s publikovanými výsledky autorů na obdobné téma výzkumu jako v této práci.

Z naměřených dat zbytkového napětí na povrchu vyplývá, že pomocí technologií LSP došlo prokazatelně ke zpevnění obou materiálů a zároveň došlo k homogenizaci zbytkového napětí ve směru 0° i 90°. Důležitým výstupem této zkoušky bylo, že materiál Böhler T552 vykazoval nejvyšší hodnoty zbytkového napětí již po druhé vrstvě LSP procesu.

Z hloubkového měření zbytkového napětí materiálů vyplývá, že u obou materiálů bylo zjištěno výrazné zvýšení zbytkového napětí až do hloubky cca 1 mm. U materiálu GOST 08CH18N10T byla naměřena vyšší míra zpevnění, a to až o 2000 MPa. Naměřenou hloubku zpevnění u GOST 08CH18N10T lze porovnat s výsledky uvedenými v článku [57], kde autor prováděl testy na podobné oceli AISI 304. V článku [57] autor publikuje výsledky měření zbytkového napětí na zpevněném materiálu technologií LSP na vzduchu s použitím ablační pásky. Porovnáním výsledků lze říct, že naměřené hloubky zpevnění jsou obdobné.

Měření mikrotvrdosti oproti měření zbytkového napětí detekovalo o cca 20 % vyšší hloubku zpevnění. Při měření byl však pozorován větší rozptyl naměřených hodnot, který částečně zkreslil výsledky zkoušky. U obou materiálů byly pozorovány vysoké hodnoty naměřené tvrdosti v nezpevněném stavu do hloubky cca 0,7 mm. Tato zpevněná vrstva byla zřejmě způsobena přípravou zkušebního materiálu broušením s velkým úběrem materiálu, kdy došlo k deformačnímu zpevnění povrchové a podpovrchové vrstvy materiálu do hloubky cca 0,7 mm.

Z výsledků tahových zkoušek je patrné že, u oceli GOST 08CH18N10 došlo k výraznému navýšení smluvní meze kluzu i pevnosti, a to na mezi kluzu o cca 40 % při čemž došlo k mírnému snížení tažnosti. Navýšení meze kluzu nastalo v důsledku zpevnění celého průřezu testovaných vzorků. Výsledky tahové zkoušky odráží charakter oceli se mechanicky zpevňovat tvářením za studena. U oceli Böhler T552 došlo k nepatrnému navýšení meze kluzu i pevnosti v důsledku nižší schopnosti se zpevňovat.

V prvotních únavových zkouškách v tříbodovém ohybu s širokým spektrem nastavení LSP procesu nebyl zcela prokázán příznivý vliv LSP technologie na únavovou životnost. Rovněž byl zjištěn velký rozptyl naměřených hodnot. Rozptyl, dle literárního zdroje [2] a konzultace s profesory Seetha Ramaiah Mannava a Vijay Vasudevan mohl být způsoben nehomogenní redistribucí zbytkového napětí při LSP procesu, použitím malých přesahů stop, nehomogenitou laserového pulsu a mikrostrukturní anizotropií. Z výše uvedených příčin je nejpravděpodobnější nehomogenní redistribuce zbytkového napětí, jelikož strategie „střelby“ nebyla přímo zaměřena na konečný tvar zkušební vzorku a polohu vrubu.

Pro ověření vlivu strategie „střelby“ bylo provedeno zpevnění zkušebního tělesa optimalizovanou strategií vycházející z numerické simulace publikované v odborném článku [37]. Naměřené hodnoty tlakového napětí v místě iniciačního vrubu na zpevněném vzorku optimalizovanou strategií bylo více jak dvojnásobné oproti nezpevněnému stavu. Z provedených únavových zkoušek pak bylo docíleno zvýšení únavové pevnosti o 180 MPa. Z tohoto experimentu vyplývá, že je zásadní používat optimalizované strategie „střelby“ pro redistribuci maximálního tlakové napětí do nejvíce namáhané oblasti zkušebního tělesa. Obdobné výsledky a závěry, avšak na titanových slitinách byly publikovány autorem Sagar Bhamare a kol. v článku [37].

Na základě zkoušek korozního praskání v roztaveném chloridu hořečnatém, lze konstatovat, že LSP má příznivý vliv proti vzniku korozního praskání. Experimentem byla ověřena schopnost technologie vnést do povrchu tlakové napětí a tím vznik korozního praskání potlačit. Výsledky experimentu se shodují s publikovanými články Y. Sana [22] a J.Z Lu [58], kteří korozní zkoušky prováděli na obdobném materiálu ANSI 304.

Zkouškami vysoko cyklové únavy bylo prokázáno, že zpevněním v oblasti defektu byl do značné míry eliminován vliv koncentrátoru napětí, a to jak na vzduchu, tak v parním kondenzátu při teplotě 100 °C. Naměřené výsledky vykazovaly větší rozptyl hodnot, který byl způsoben především charakterem zkušebního materiálu Böhler T552, který vykazoval horší hodnoty mikro čistoty s obsahem globulárních vměstků, které ovlivňují iniciaci únavových trhlin. Dalším aspektem rozptylu naměřených hodnot mohl být způsoben procesem zpevňování povrchu pomocí technologie LSP a to zejména nepřesností umístění první stopy v oblasti vrubu. Na výsledné hodnoty únavové pevnosti měl rovněž velký vliv tvar a velikost vrubu (umělého důlku). V této práci byl vrub vyroben laserovým vývrtem a měl tvar kužele s vysokým vrubovým účínkem. Výsledky VCÚ lze částečně porovnat například s publikovaným článkem od Bern M. Schönbauer [55]. Autor s kolektivem publikuje rozsáhlé výsledky testů VCÚ na obdobné martenzitické oceli 403/410 12 % Cr bez zpevnění v oblasti vrubu. Autor však použil vzorky s uměle vyrobenými korozními vruby chemickou cestou s hloubkou od 50 μm do 250 μm. Tvar korozních bodů byl semi-eliptický s menším vrubovým účínkem než u vzorků testovaných v této práci. Dle výsledků S-N křivek z článku [55] na vzduchu byl pokles únavové pevnosti při 10⁹ cyklu z 500 MPa (hladké vzorky) na 370 MPa. Nižší pokles únavové pevnosti na materiálu 403/410 12 % Cr, než na materiálu Böhler T552 byl z největší pravděpodobnosti způsoben menším vrubovým účínkem vyrobených korozních bodů.

Z fraktografických expertíz lomových ploch lze konstatovat, že na hladkých zkušebních tělesech série č. 1 (hladká tělesa bez vrubu) se trhlinka iniciovala a dále šířila z povrchu nebo pod povrchem. Iniciátor trhlinky byl především komplexní vměstek na povrchu či pod povrchem zkušebního tělesa. Zkušební tělesa série č. 2 s uměle vyrobeným vrubem vykazovaly více jak 4násobně nižší únavovou pevnost. Trhlinka se iniciovala a šířila z hrany a boku kuželového vrubu apriorně po povrchu zkušebního tělesa. Zpevněná zkušební tělesa s vrubem sérií č. 3 a 4 vykazovala vysokou únavovou pevnost blízkou se zkušebními tělesům bez vrubu sérii č. 1. Hlavní odlišností u charakterů lomové plochy bylo potlačení vzniku a šíření trhlinky po povrchu zkušebního tělesa. Série č. 5 – zpevněná zkušební tělesa s vrubem zkoušená v parním kondenzátu dosahovala vyšší únavové pevnosti než série č. 2 bez zpevnění. Charakter lomových ploch jednotlivých sérií byl podobný až na sérii č. 5, kde byl pozorován vyšší výskyt interkrystalických fazet v blízkosti vrubu. Vyšší výskyt interkrystalických fazet na lomové ploše je charakteristický pro zkoušky ve vodním prostředí. Za předpokladu platnosti teorie, že

rozteč striačných linií je rovna přírůstku trhliny na jeden cyklus (da/dN) [30], lze konstatovat, že u zpevněných vzorků byl nárůst trhliny na jeden cyklus nižší než u nezpevněné. Zpevnění technologií LSP oblasti vrubu zpomalilo vznik únavových trhlin a změnilo charakter šíření trhlin.

8.1 Plán dalšího výzkumu v oblasti LSP

Výsledky této disertační práce a další poznatky z experimentálních prací přinášejí další náměty k následujícím výzkumným činnostem:

- Analýza rozložení zbytkového napětí v oblasti vrubu po zpevnění technologií LSP, za účelem podrobnějšího popsání redistribuce zbytkového napětí. Pro tyto účely budou vzorky podrobeny EBSD analýzám a rentgenovým měřením zbytkového napětí
- Analýza vlivu velikosti umělého vrubu (průměr a hloubka) na únavovou životnost po zpevnění povrchu technologií LSP
- Optimalizace LSP procesu pro zvýšení životnosti komponent s povrchovými vruby korozního či technologického charakteru
- Zpevnění reálné lopatky parní turbíny s kritickými korozními důlky a potlačení vzniku a šíření únavových trhlin
- LSP zpevnění kořene heterogenního svarového spoje sekundárního okruhu JE za účelem zvýšení životnosti a bezpečnosti v připravovaném projektu
- Využití LSP pro zvýšení odolnosti lopatek parních turbín proti kavitaci na materiálu Böhler T671
- Využití LSP pro zvýšení životnosti opravovaných vodních turbín po opravném svařování

9 Závěr

Na základě studia vlivu Laser Shock Peening na povrchové vlastnosti dvou ocelí GOST 08CH18N10 a Böhler T552 lze konstatovat následující závěry.

Bylo ověřeno, že danou optimalizovanou metodou dochází k výrazným změnám povrchových vlastností. Tyto změny jsou silně ovlivněny parametry nastavení laseru, strategií rozmístění jednotlivých pulsů na povrchu, hustotou energií pulsu, typu ablační vrstvy, stavem materiálu a provedením. Změny povrchových vlastností se projevují na změně užitečných vlastností (únavové pevnosti, rozložení zbytkových napětí a odolnosti proti koroznímu praskání).

Pro ocel GOST 08CH18N10T bylo zjištěno, že nejlépe se jeví nastavení technologie LSP pro dosažení optimálních výsledků jsou tyto.

- Pro únavové namáhání v třibodovém ohybu s vrubovaným zkušebním tělesem: použití strategie umístění jednotlivých pulsů, kterým se docílí řízeného přesunutí tlakového napětí do místa vrubu, a nastavením LSP procesu na hodnoty (energie pulsu 2,5 J, stopa laseru 2x2 mm, hustota pulsu 6.25 GW/cm², 50% překryv pulsu, použití ochranné vinylové pásky, 3 sekvence)
- Proti koroznímu praskání: použití standardní strategie rozmístění pulsů – po řádcích vedle sebe a nastavením LSP procesu (energie pulsu 2,5 J, stopa laseru 2x2 mm, hustota pulsu 6,25 GW/cm², překrytí 50 % s použitím ochranné ablační vinylové pásky, 2 sekvence)

Únavová pevnost se u oceli GOST 08CH18N10T zvýšila o 50 %. Korozní odolnost oceli GOST 08CH18N10T v prostředí chloridu hořečnatém byla vyšší než u nezpevněných vzorcích. Na nezpevněných vzorcích byly již po 2 hodinách pozorovány korozní trhliny. U zpevněných vzorcích nebyly trhliny pozorovány, ani po 20hodinové expozici.

Jako možná aplikace ze získaných výsledků pro ocel GOST 08CH18N10T se jeví využití při zpevňování kritických míst v chladicích okruzích jaderných elektráren, kde může docházet ke koroznímu praskání například: heterogenní svarové spoje sekundárních okruhů a oběhová čerpadla chladicího okruhu.

Pro ocel Böhler T552 bylo zjištěno, že nejlépe se jeví nastavení technologie LSP pro dosažení optimálních výsledků jsou tyto.

- Pro únavové namáhání v tahu s vrubovaným vzorkem simulující bodové korozní napadení: použití strategie umístění 3 pulsů v sekvenci v kolmém směru na osu namáhání, kterým se docílí řízeného přesunutí tlakového napětí do místa vrubu a nastavením LSP procesu na hodnoty (energie pulsu 4 J, stopa laseru 2x2 mm, hustota pulsu 10 GW/cm², 50% překryv pulsu, použití ochranné vinylové pásky a 3 sekvence)

Únavová pevnost vrubovaných vzorků na vzduchu se u oceli Böhler T552 zvýšila z 80 MPa (nezpevněný stav) na hodnotu 260 MPa (zpevněný stav). V prostředí parního kondenzátu při teplotě 100 °C na hodnotu 160 MPa (zpevněný stav).

Jako potenciální aplikace ze získaných výsledků pro ocel Böhler T552 se jeví využití pro zpevňování oblasti korozních důlků touto metodou. Zpevnění vede k nárůstu únavové pevnosti blízké se hodnotě bez přítomnosti korozních důlků.

Za hlavní přínosy disertační práce lze považovat vyvinutí a ověření metodiky aplikace Laser Shock Peening pro zvýšení únavové a korozní odolnosti na materiálech GOST 08CH18N10T a Böhler T552z. Dále pak zmapování a popsání mechanismu šíření únavové trhliny na zpevněných a nezpevněných vzorcích pomocí fraktografických analýz.

10 Citovaná literatura

- [1] Jack Champaigne, History of Shot Peening Specifications, Ninth International Conference on Shot Peening, Spring 2006
- [2] K. Ding and L. Ye, Laser shock peening, Performance and process simulation, Woodhead Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals and Mining, Cambridge England, Spring 2006
- [3] Robert P. Tata, P.E., Shot Peening Technology, Continuing Education and Development, Inc., 9 Greyridge Farm Court, Stony Point, NY 10980, 2014
- [4] Harish Kumar, Modified Shot Peening Processes, International Journal of Engineering Sciences & Emerging, ISSN: 2231-6604, Volume 5, ©IJESET, 2013
- [5] Internetový zdroj, http://oskkiefer.de/wpcontent/uploads/28efinition_of_shot_peening_control_and_parameters_go.pdf, 15.7.2017
- [6] Internetový zdroj, http://ferrocoblast.com/r_d/shot_peening_peen_forming, 15.7.2017
- [7] SONATS Empowering Technologies, Fatigue life improvement of welded structures by Ultrasonic Needle Peening, 2015
- [8] Y. Kudryavtsev, Fatigue Life Improvement of Tubular Welded Joints by Ultrasonic Peening, INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 2010
- [9] Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement (MRP-267, Revision 2), EPRI Project, July 2016
- [10] Jan Brajer, Application of laser shock peening, STČ 2014, ISBN 978-80-01-05484-0
- [11] Zbyněk Špirit, Jan Kaufman, Increase of materiál cycle fatigue life time using the laser shock peening, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, 2019, ISBN 978-80-261-0885-6
- [12] R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, and J. Virmont, Physical study of laser produced plasma in confined geometry, Journal of Applied Physics 68 (775), 10.1063/1.346783, 1990
- [13] D.W. Baherle, Laser Processing and Chemistry, 2011
- [14] D. Bergström, J. Powell, and A. F. H. Kaplan, The absorption of light by rough metal surfaces—A three-dimensional ray-tracing analysis, Journal of Applied Physics 103, 103515 (2008).
- [15] J. Kaufman, PhD Thesis, CVUT, 2017
- [16] IRIZALP, S. G., N. Saklakoglu, Peening of Metallic Materials. Material Science and Materials Engineering. 2017, 408-440

- [17] R. Zhang, R.K. Gupta, C.H.J. Davies, A.M. Hodge, M. Tort, K. Xia, and N. Birbilis, The Influence of Grain Size and Grain Orientation on Sensitization in AA5083, *Corrosion* 72(2), pp. 160-168 (2016).
- [18] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, and H.P. Lieurade, Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour, *Materials Science and Engineering A210*, 102-113 (1996).
- [19] FAIRAND, A. H., CLAUER, B. P. Interaction of laser-induced stress waves with metals. *Proceedings of the ASM Conference Applications of Lasers in Materials Processing*, Washington, DC, USA, 18–20 April 1979; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1979.
- [20] FAIRAND, B. P., CLAUER, A. H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.* 1979, 50, 1497–1502.
- [21] FAIRAND, B. P., WILCOX, B. A., GALLAGHER, W. J., WILLIAMS, D. N. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum. *J. Appl. Phys.* 1972, 43, 3893–3895.
- [22] N. Mukai, N. Aoki, M. Obata, A. Ito, Y. Sano, C. Konagai, Laser processing for underwater maintenance in nuclear plants, *Proceedings of the 3rd JSME/ASME joint international conference on nuclear engineering 3*, (1995).
- [23] VÁCLAVÍK, J. a kol. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí. ZČU v Plzni. FST. KMM. Plzeň, 2012
- [24] Papež, P. Diplomová práce „Vliv Laser Shock Peening na mechanické vlastnosti oceli, ZČU v Plzni. FST. KMM. Plzeň, 2019
- [25] ODBOR Termomechaniky technologických procesů. Termomechanika technologických procesů. Odvrtávací metoda (metoda otvoru). [Online] ZČU Plzeň, 2000-2015
- [26] Internetový zdroj, <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody#anchor-basics>, 10.10.2019
- [27] Internetový zdroj, <https://fightersweep.com/2055/bad-bone-fun-facts-boeing-rockwell-b-1b-lancer/>, 10.10.2019
- [28] Internetový zdroj, <http://www.samolotypolskie.pl/samoloty/1652/126/Lockheed-Martin-F-16C-D-Jastrzab2>, 10.10.2019
- [29] Internetový zdroj, <https://www.pinterest.co.uk/pin/320881542178828378/>, 10.10.2019
- [30] Skálová J. Kovařík R. Benedikt V. - Základní zkoušky kovových materiálů, FST ZČU 2010, ISBN 978-80-7043417-8
- [31] Špirit Z. Kasl J. - Výzkumná zpráva č. 1544, FST ZČU 2010, Centrum výzkumu Řež s.r.o. Sekce 8540 – MAT, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň 2016

- [32] Materials Reliability Program: Technical Basis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Mitigation by Surface Stress Improvement (MRP-267, Revision 2), EPRI Project, July 2016
- [33] Špirit Z. Kasl J. - Výzkumná zpráva č. 1544, FST ZČU 2010, Centrum výzkumu Řež s.r.o. Sekce 8540 – MAT, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň 2016
- [34] TOTTEN, George E. Encyclopedia of iron, steel and their alloys – vol 5. 2016. ISBN13: 978-1-4987-6268-7
- [35] Internetový zdroj, <https://www.bohler.cz/cs/products/t552/>; dne 01.02.2020
- [36] Pilar J, De Vido M, Divoky M, Mason P D (eds), Characterization of Bivoj/DiPOLE 100: HiLASE 100-J/10-Hz diode pumped solid state laser, [online] <http://www.hilase.cz/?s=lsp> [cit.2018-09-25]
- [37] Sagar Bhamare, Gokul Ramakrishnan, Seetha R. Mannava, Kristina Langer, Vijay K. Vasudevan, Dong Qian, Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy, Surface & Coatings Technology 232 (2013) 464-474, 2013
- [38] Josef Strejcius, Zbyněk Špirit, Jan Brajer a Jan Kaufman, Technologie Laser Shock Peening pro opravu turbínových lopatek poškozených důlkovou korozí, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, 2020, ISBN 978-80-261-0959-4
- [39] Kasl, J., Lazar. (2019): Hodnocení vlivu korozních důlků na rozvoj únavového porušování oběžných lopatek NT dílů parních turbín. Výzkumná zpráva VYZ-VZ-58/19/081, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [40] Strejcius, J., Folková, E., Kasl, J., Janoušek, J., Špirit, Z., Korozně-únavová pevnost martenzitických ocelí T552 a T671 v parním kondenzátu, Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, 2016, ISBN 978-80-261-0644-9
- [41] Program on Technology Innovation: Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades AISI 403/410 (12%Cr) and 17-4PH Blade Steels, EPRI Final Report 3002005107, February 2015
- [42] Matocha, K.: Mechanismus korozní únavy a korozního praskání pod napětím systémů ocel / vodní prostředí. Studie dílčího úkolu v rámci výzkumného centra VŠB – Vítkovice, Ostrava, 2000
- [43] Klesnil, M., Lukáš, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání. Akademie, Praha 1975.
- [44] Murakami, Y.: Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions: Elsevier Science Ltd., 2002.
- [45] Zavitkovská, J. Diplomová práce „Úprava povrchových vlastností austenitických ocelí s ohledem na korozní odolnost“, ZČU v Plzni. FST. KMM. Plzeň, 2021

- [46] Matějová, M, Technická zpráva „Metalografický rozbor zkušebních bloků z oceli T552 a T671 na oběžné lopatky“, VZÚ v Plzni, 2015, VYZ-TZ-52/15/092
- [47] Kolařík, K: Využití rentgenové difrakční analýzy při studiu integrity povrchu, FTFI, ČVUT
- [48] Internetový zdroj, http://homel.vsb.cz/~lic098/files/9.cviceni_VZM.pdf; dne 01.06.2021
- [49] Internetový zdroj, https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf, dne 01.06.2021
- [49] Internetový zdroj, https://docspike.com/downloadFile/korozni-praskani_pdf?preview=1, , dne 01.06.2021
- [50] Internetový zdroj, <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?f?redirected>, dne 01.06.2021
- [51] E.J. Dolley, B. Lee and R.P. Wei, The effect of pitting corrosion on fatigue life. *Fatigue Fract Eng M* 23(555-560) (2000).
- [52] N. Acuña, J. González-Sánchez, G. Kú-Basulto and L. Monínguez, Analysis of the stress intensity factor around corrosion pits developed on structures subjected to mixed loading. *Scripta Mater* 55 (2006) 363-366.
- [53] S. Beretta, M. Carboni, G. Fiore and A. Lo Conte, Corrosion-fatigue of A1N railway axle steel exposed to rainwater. *Int J Fatigue* 32(952-961) (2010).
- [54] Internetový zdroj, https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/pitting_corrosion.htm, dne 01.06.2021
- [55] Bernd M. Schönbauer, Stefanie E. Stanzl-Tschegg, Andrea Perlega, Ronald N. Salzman, Neville F. Rieger, Shengqi Zhou, Alan Turnbull, David Gandy, Fatigue life estimation of pitted 12% Cr steam turbine blade steel in different environments and at different stress ratios *International Journal of Fatigue* (IF5.186), Pub Date : 2014-08-01
- [56] Program on Technology Innovation: Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbines, EPRI Project, 2010
- [57] S.Clitheroe, M.Turski, A.Evans, J.Kelleher, D.Hughes, P.Withers, COMPARISON OF PEENING TECHNIQUES ON 304 AUSTENITIC STAINLESS STEEL, S, Internetový zdroj, <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2008044.pdf>, dne 01.06.2021
- [58] J.Z. Lua,e, K.Y. Luo,a, D.K. Yangb, X.N. Chengc, J.L. Hud, F.Z. Daia,H.Qia, L. Zhanga, J.S. Zhonga,Q.W. Wanga, Y.K. Zhanga, Effects of laser peening on stress corrosion cracking (SCC) of ANSI 304austenitic stainless steel
Internetový zdroj, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.044> <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2008044.pdf>, dne 05.06.2021

11 Publikační činnost doktoranda

11.1 Publikované články na téma DiP

| Typ | Název příspěvku na téma DP /Autoři | Podíl [%] | Dostupnost | Událost/časopis | ISSN/ISN |
|-----|--|-----------|------------------|---|------------------------------|
| D | Effect of Laser Shock Peening on Fatigue life of Austenitic stainless steels Špirit, Z.; Brajer, J.; Kaufman, J.; Chocholoušek, M.; Bohm, M.; Kott, J.; Strejcius, J. | 80 | 23.05.2018 | COMAT2018 | 978-80-87294-86-4 |
| D | INFLUENCE OF LASER SHOCK PEENING ON RESIDUAL STRESS AND FATIGUE LIFE OF STAINLESS STEELS Špirit, Z.; Kaufman, J.; Strejcius, J.; Chocholoušek, M.; Kott, J. | 85 | 23.11.2019 | METAL 2019 | ISBN 978-80-87294-91-8 |
| D | ZVÝŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ METODOU LASER SHOCK PEENING Špirit, Z.; Kaufman, J.; Brajer, J.; Strejcius, J.; Chocholoušek, M. | 80 | 24.10.2019 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v | ISBN 978-80-261-0885-6 |
| D | INCREASE THE FATIGUE LIFE OF STAINLESS STEEL BY LASER PEENING SHOCK PEENING Špirit, Z.; Kaufman, J.; Strejcius, J.; Chocholoušek, M.; Kott, J. | 85 | Přijato k vydání | DAAAM 2019 | Bude publikováno v roce 2020 |

11.2 Publikované články

| Typ | Název příspěvku/Autoři | Podíl [%] | Dostupnost | Událost/časopis | ISSN/ISN |
|-----|--|-----------|------------|--|-------------------|
| D | Korozně-únavová pevnost precipitačně zpevněných martenzitických ocelí MLX17 a T671 v parním kondenzátu znečištěném chloridovými ionty Strejcius, J.; Folková, E.; Kasl, J.; Řehořek, J.; Špirit, Z. | 20 | 20.10.2015 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách | 978-80-261-0522-0 |
| D | Measurement of Fracture Toughness of Cemented Carbides Špirit, Z.; Kříž, A.; Janoušek, A. | 90 | 28.01.2015 | SEMDOK 2015 | 978-80-554-0981-8 |
| J | Utilization of Light Microscopy for the Evaluation of Fracture Toughness of Cemented Carbides Špirit, Z.; Kříž, A. | 90 | 20.05.2015 | Key Engineering Materials | 1662-9795 |
| D | Fatigue performance of blade steel T671 for different kinds of loading Janoušek, J.; Hřeben, S.; Špirit, Z.; Strejcius, J.; Kasl, J. | 30 | 07.06.2016 | BALTICA X | NE |
| D | Testing of T91 steel in heavy liquid metals Chocholoušek, M.; Fulín, Z.; Janoušek, J.; Špirit, Z. | 20 | 09.11.2016 | Comat 2016 | 978-80-87294-69-7 |
| D | Anizotropie mechanických vlastností tenkostěnných trubek z ODS ocelí (Anisotropy of mechanical properties in ODS steel tubes) Špirit, Z.; Chocholoušek, M.; Šíma, M. | 85 | 18.10.2016 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách | 978-80-261-0644-9 |
| D | Fatigue performance of blade steel T552 in a corrosive environment Janoušek, J.; Hřeben, S.; Špirit, Z.; Strejcius, J.; Kasl, J. | 30 | 09.11.2016 | Comat 2016 | 978-80-87294-69-7 |
| D | Mechanical testing of anisotropy in ODS steel tubes Špirit, Z.; Chocholoušek, M.; Šíma, M. | 80 | 09.11.2016 | Comat 2016 | 978-80-87294-69-7 |
| D | Zkoušení oceli T91 v korozním prostředí těžkých tekutých kovů (Testing of T91 steel in the environment of heavy liquid metals) Chocholoušek, M.; Fulín, Z.; Janoušek, J.; Špirit, Z. | 20 | 18.10.2016 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách | 978-80-261-0644-9 |
| D | Evaluation of Low Cycle Fatigue Strength of Dissimilar Weld Joint of COST F and FB2 steels for high temperature applications Strejcius, J.; Janoušek, J.; Špirit, Z. | 25 | 02.01.2017 | SUSEN Technologies for the Gen.IV | 978-80-270-0925-1 |
| D | Study of crack initiation in ferritic martensitic steel T91 in PbBi Di Gabriele, F.; Hojná, A.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z. | 20 | 02.01.2017 | SUSEN Technologies for the Gen.IV | 978-80-270-0925-1 |
| D | Anisotropy of mechanical properties in ODS steel tubes Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Šíma, M. | 45 | 13.01.2017 | SUSEN Technologies for the Gen.IV | 978-80-270-0925-1 |
| J | Testing of T91 steel in heavy liquid metals Chocholoušek, M.; Fulín, Z.; Janoušek, J.; Špirit, Z. | 20 | 01.03.2017 | IOP Conference Series: Materials Science and | 1757-899X |
| J | Fatigue performance of blade steel T552 in a corrosive environment Janoušek, J.; Hřeben, S.; Špirit, Z.; Strejcius, J.; Kasl, J. | 25 | 01.03.2017 | IOP Conference Series: Materials Science and | 1757-899X |
| J | Mechanical testing of anisotropy in ODS steel tubes Špirit, Z.; Chocholoušek, M.; Šíma, M. | 85 | 01.03.2017 | IOP Conference Series: Materials Science and | 1757-899X |
| D | Preliminary consideration of crack initiation in ferritic martensitic steel T91 and austenitic 15-15Ti in liquid PbBi Di Gabriele, F.; Hojná, A.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z. | 20 | 09.10.2017 | EUROCORR 2017 | NE |
| D | Crack initiation in ferritic martensitic steel T91 and austenitic 1.4970 in PbBi Chocholoušek, M.; Di Gabriele, F.; Hojná, A.; Špirit, Z. | 20 | 27.09.2017 | EUROMAT 2017 | NE |
| D | Characterisation of mechanical properties of Fe10CrAl steel under vacuum and in PbBi eutectic Di Gabriele, F.; Chocholoušek, M.; Hojná, A.; Szakalos, P.; Špirit, Z. | 10 | 15.09.2017 | EUROMAT 2017 | NE |

| | | | | | |
|---|---|----|------------------|--|------------------------|
| D | Mechanical behaviour of coated T91 steel in PbBi eutectic | 25 | 20.09.2017 | EUROMAT 2017 | NE |
| | Di Gabriele, F.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Deambrosio, S.; Miorin, E.; Montagner, F.; Ricci, E.; Vassallo, E. | | | | |
| D | COATINGS USED FOR HEAVY LIQUID METAL APPLICATIONS | 20 | 20.09.2017 | EUROMAT 2017 | 978-80-270-5393-3 |
| | Chocholoušek, M.; Rozumová, L.; Špirit, Z.; Di Gabriele, F. | | | | |
| D | Crack initiation in Heavy Liquid Metals, the KAMILE experience | 15 | 08.06.2018 | Nuclear 2018 | ISSN 2066-2955 |
| | Di Gabriele, F.; Hojna, A.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Lorincik, J.; Halodova, P.; Duchon, J. | | | | |
| J | CRACK INITIATION IN HEAVY LIQUID METALS, THE KAMILE EXPERIENCE | 15 | 08.08.2018 | Journal of Nuclear Research and Development | 2247 – 191X |
| | Di Gabriele, F.; Hojná, A.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z. | | | | |
| D | Coatings on Steels T91 and 316L in Lead-Bismuth Eutectic Environment | 20 | 11.12.2018 | COMAT2018 | 978-80-87294-86-4 |
| | Chocholoušek, M.; Rozumová, L.; Špirit, Z.; Di Gabriele, F. | | | | |
| D | Influence of PbBi eutectic on the crack initiation in 316L and T91 steels | 35 | 23.05.2018 | METAL 2018 | 978-80-87294-84-0 |
| | Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Di Gabriele, F.; Hojná, A. | | | | |
| J | INITIATION OF LME CRACK IN FERRITIC MARTENSITIC STEEL IN LIQUID LEAD-BISMUTH | 25 | 20.09.2018 | Journal of Nuclear Materials | 0022-3115 |
| | Hojná, A.; Di Gabriele, F.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Halodová, P.; Lorincik, J. | | | | |
| J | Study of crack initiation of 15-15Ti austenitic steel in liquid PbBi | 20 | 08.10.2018 | Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science | 2332-8975 |
| | Hojná, A.; Di Gabriele, F.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Rozumová, L. | | | | |
| D | Characterisation of crack initiation and growth in austenitic 1.4970 steel in PbBi | 10 | 23.05.2018 | METAL 2018 | 978-80-87294-84-0 |
| | Rozumová, L.; Hojná, A.; Di Gabriele, F.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z. | | | | |
| D | Nuclear grade concrete behavior under gamma irradiation and loss of coolant accident conditions | 20 | 29.05.2018 | 8th International Conference & Workshop REMOO 2018 | ISBN 978-3-9818275-6-9 |
| | Hlaváč, Z.; Mohyla, R.; Špirit, Z.; Patera, J.; Schulc, M.; Kořátková, J. | | | | |
| D | Environmentally assisted crack initiation in heavy liquid metals | 15 | 25.06.2019 | MSMF9 | ISBN 978-80-214-5760-7 |
| | Hojná, A.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z.; Rozumová, L. | | | | |
| D | KOROZNĚ ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI OCELI 13%Cr4%Ni PRO KOMPONENTY VODNÍCH TURBÍN / CORROSION-FATIGUE PROPERTIES OF 13%Cr4%Ni Steel FOR HYDROTURBINE | 35 | 01.10.2019 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách | ISBN 978-80-261-0885-6 |
| | Strejcius, J.; Špirit, Z.; Fulín, Z. | | | | |
| D | Testing Device for Heavy Liquid Metal Environment | 20 | 24.09.2019 | METAL 2019 | ISBN 978-80-261-0885-6 |
| | Chocholoušek, M.; Fulín, Z.; Špirit, Z. | | | | |
| D | TECHNOLOGIES FOR TESTING AND PRECISE MEASUREMENT IN HEAVY LIQUID METALS | 20 | 22.05.2019 | METAL 2019 | ISBN 978-80-87294-91-8 |
| | Chocholoušek, M.; Fulín, Z.; Špirit, Z. | | | | |
| J | Environmentally assisted cracking of the T91 in heavy liquid metals | 10 | Přijato k vydání | Corrosion Reviews | 2191-0316 |
| | Hojná, A.; Halodová, P.; Rozumová, L.; Chocholoušek, M.; Špirit, Z. | | | | |

11.3 Vystoupení na konferencích a seminářích v rámci DIP

| Přednáška na téma/stáže | Datum vystoupení | Událost |
|--|-------------------------|--|
| Effect of Laser Shock Peening on Fatigue life of Austenitic stainless steels | 14.11.2018 | COMAT2018 Recent Trends in Nuclear Materials |
| Studijní stáž na technické univerzitě Cincinnati u profesora Mannavi se zaměřením na LSP technologii | 28.11.2018 – 21.12.2018 | Studijní stáž v Cincinnati |
| INFLUENCE OF LASER SHOCK PEENING ON RESIDUAL STRESS AND FATIGUE LIFE OF STAINLESS STEELS | 22.05.2019 | 28th International Conference on Metallurgy and Materials |
| ZVÝŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ METODOU LASER SHOCK PEENING | 24.10.2019 | Zvyšování životnosti komponent |
| INCREASE THE FATIGUE LIFE OF STAINLESS STEEL BY LASER PEENING SHOCK PEENING | 23.10.2019 | DAAAM International Vienna Vienna University of Technology |

11.4 Vystoupení na konferencích a seminářích


| Přednáška na téma | Datum vystoupení | Událost |
|---|------------------|--|
| Measurement of Fracture Toughness of Cemented Carbides | 28.01.2015 | SEMDOK 2015 |
| Špirit, Z.; Kříž, A.; Janoušek, A. | | |
| Utilization of Light Microscopy for the Evaluation of Fracture Toughness of Cemented Carbides | 20.05.2015 | Key Engineering Materials |
| Anizotropie mechanických vlastností tenkostěnných trubek z ODS oceli (Anisotropy of mechanical properties in ODS steel tubes) | 18.10.2016 | Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách |
| Mechanical testing of anisotropy in ODS steel tubes | 09.11.2016 | Comat 2016 |

12 PŘÍLOHY

12.1 Nejvýznamnější publikované články v oblasti LSP

- [1] Špirit, Z.; Kaufman, J.; Strejcius, J.; Chocholoušek, M.; Kott, J.; Increase of the fatigue life of stainless steel by laser shock peening, DAAAM 2019, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679
- [2] Špirit, Z.; Kaufman, J.; Strejcius, J.; Chocholoušek, M.; Kott, J.; Influence of Laser Shock Peening on residual stress and fatigue life of stainless steels; METAL 2019; ISBN 978-80-87294-91-8
- [3] ŠPIRIT, Z., KAUFMAN, J., CHOCHOLOUŠEK, M., STREJCIUS, J. Mechanical tests results of Laser shock peening treated austenitic steel. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science [online]. 2021, [cited 2021-06-22]. ISSN 2332-8975.

12.2 Zkušební protokol k materiálu GOST 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, složka 250/1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 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. Werksauftragsnummer / Produktionsnummer | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Škoda JS a.s. Orlik 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. | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Vykovek-tyč KR 180 Rozměr: pr.180+1 x celkem 1845 kg | 08CH18N10T A | 474322 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zkušební předpis / Požadavky Test Prescription / Requirements Prüfgrundlagen / Anforderungen Ae 5375/DOK, Rev.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TAVEBNÍ ANALÝZA / HEAT ANALYSIS / SCHMELZANALYSE (vln % nebo/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 | ppm | |
| - | 1 | - | - | - | 17 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 0,08 | 2 | 0,8 | 0,035 | 0,02 | 10 | 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 ocelí / Steel producer / Stahhersteller : | | | | ŽDAS, a.s. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Č. zk. Test No. Probe Nr. | Směr Direction Probelage | Teplota zk. Testing temp. Prüftemp. | Mez kluzu Yield stress Streckgrenze | Pevnost Tensile strength Zugfestigkeit | Táhnost Elongation Dehngrenze | | Kontrakce Reduction Einschnürung | Teplota zk. Testing temp. Prüftemp. | Vnitřní houbovitost Energy of impact Kerbschlagzähigkeit | | Tvrdość Hardness Härte | | | | | | | | | |
| | | °C | MPa | MPa | A: L = 5d B: L = 2" | % | % | °C | | | | | | | | | | | | |
| 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 | 208 | 404 | A | 28 | 70 | - | - | - | - | - | | | | | | | | |
| E 148-2 | L | 20 | 265 | 555 | 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: Kennzeichnung: | Materiál, Tavba, Č. zkoušky, Č. vykovku Material, Heat No., Test No., Forging No. Werkstoff, Schmelze, Probe Nr., Schmiedstück Nr. | | | | | | Značka výrobce, příjemce: Mark of factory, factory inspector: Hersteller- und Sachverständigenkennzeichen: | | | | | | ZVK | | | | | | | |
| Poznámky: Notes: Bemerkungen: | Požadavky na materiál podle Ae 5375/DOK, Rev.3 jsou splněny. Zkouška na mezikrystalovou korozi vyhovuje dle GOST 6032-03 metoda AM. 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 den Anforderungen in der Bestellung.

ZVU Kovárna a.s.
 ÚŘJ - státní technická
 Průmysl 332 IFO, Box 21
 501 47 Hradec Králové
 IČ: 03210944

ZVU Kovárna a.s.
 ÚŘJ - státní technická
 Průmysl 332 IFO, Box 21
 501 47 Hradec Králové
 IČ: 03210944

20.3.2015
 Datum / Date

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

ÚŘJ 37 / 99

Strana: 1 / 1

| | | | |
|--|---|---|---|
|  | | 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 | Jakoť Werkstoff Quality | Číslo tavby Schmelze Nr. Heat No. |
| 6 | Výkovek-tyč KR 180 Rozměr: pr.180*1 x celkem 1846 kg E 148 | 08Ch18N10T A | 474322 |
| Zkušební předpis / Požadavky Prüfgrundlagen / Anforderungen Test prescription / Requirements Ae 5375/DOK. Rev.3 | | | |

Znečištění nekovovými vměstky dle GOST 1778-70-metoda Š4

| Číslo vzorku | Řádkové kyslíčiny | Bodové kyslíčiny | 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 |
| Součet | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,50 | 2,00 | 0,00 |

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 stěnová kontrola /a výroba jsou vyhovující
 Bruchtig und Abmessung: o. B. / Die gesamten Anforderungen sind erfüllt
 Surface and dimensional inspection: o. O. / Manufacturing requirements are fulfilled

20.3.2015

Řečeno a podpis výrobní kontroly
 Stempel des Werkstoffverständigen
 Stamp of factory inspector



ZVU Kovárna a.s.
 Úřad - státní inspekce 1
 Pražská 322 P.O.Box 21
 501 47 Hradec Králové
 IČ: 585 19814


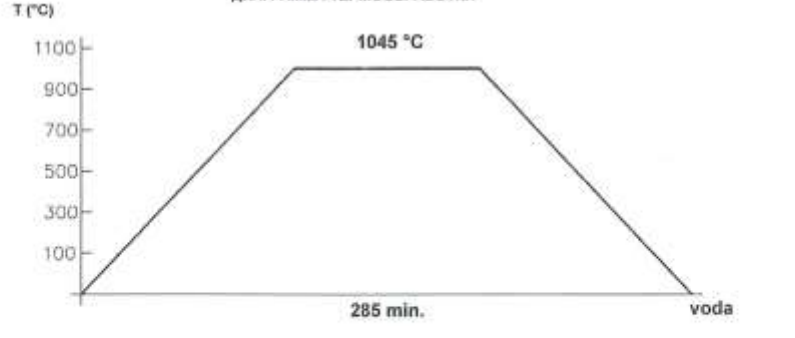
ZVU Kovárna a.s.
 Úřad - státní inspekce 1
 Pražská 322 P.O.Box 21
 501 47 Hradec Králové
 IČ: 585 19814

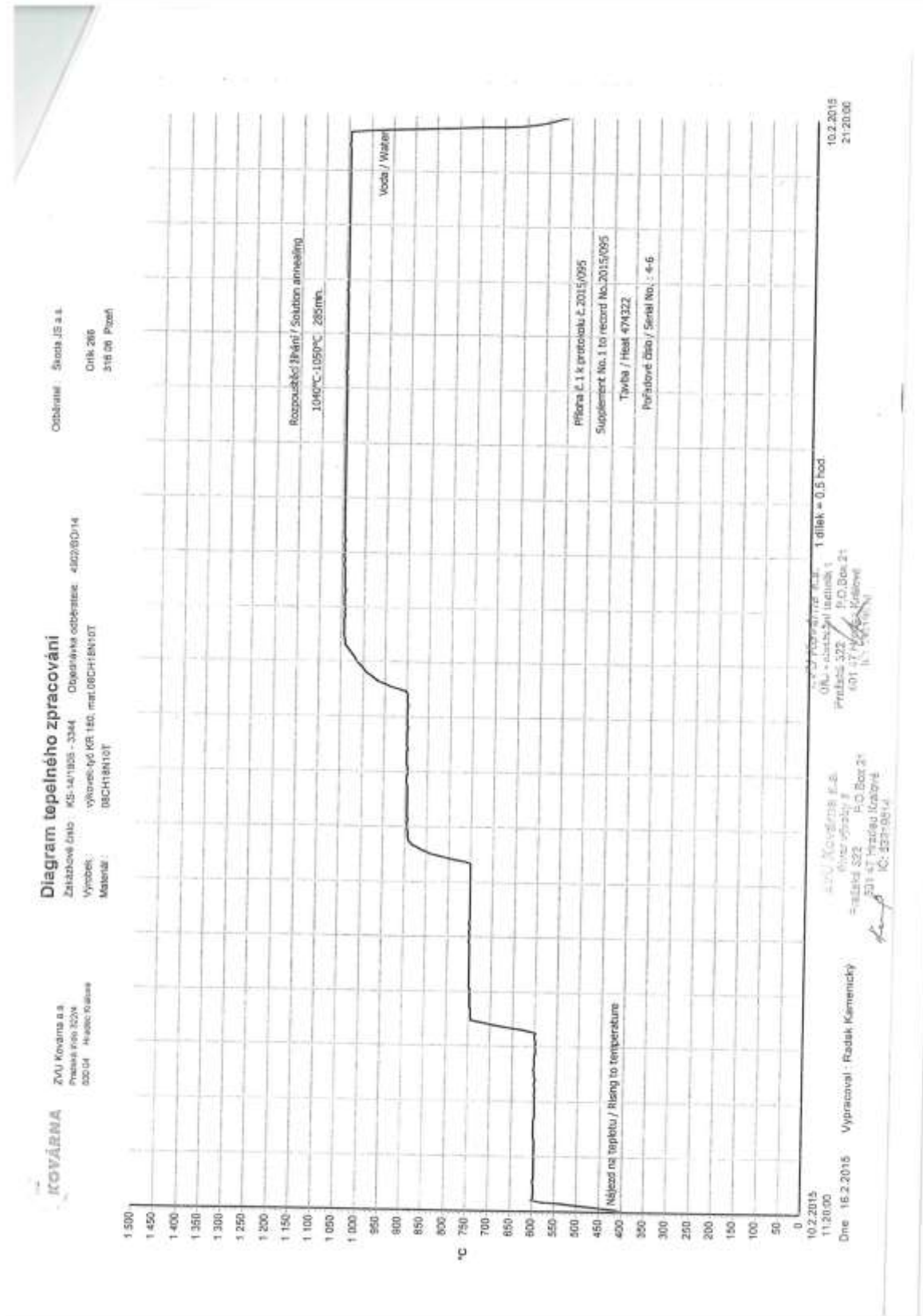
08J 27 / 00

| | | | | |
|--|---|--|---|---|
|  | | 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 | | |
| | | po after nach | | |
| | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | lep. zpracování heat treatment Wärmebehandlung | | |
| Vyhodnocení / připustnost dle // Evaluation / Acceptance to // Bewertung / Abnahmekriterien | | | | |
| Ae 5375/DOK. Rev.3 | | | | |
| Přístroje: Equipments: Prüfgeräte: | | Olympus Epoch 600 | | |
| Frekvence: Frequency: Frequenz: | | 2 MHz | | |
| Typ sondy: Search unit: Prüfkopf: | | B2S, WB 45-1 | | |
| Stav povrchu: Surface condition: Oberflächenzustand: | | obroben | | |
| | | Nastavení citlivosti: Sensitivity adjustment: Empfindlichkeitseinstellung: | | |
| | | DGS scale | | |
| | | Registrační hranice: Register size: Registergrenze: | | |
| | | 3,6 mm | | |
| | | Kalibrační měrka: Calibration etalon: Eichblock: | | |
| | | K 1 | | |
| | | Vazba: Couplant: Kopplungsmittel: | | |
| | | Olej | | |
| Výsledek zkoušky / Test result / Prüfergebnis | | | | |
| 6 x vyhovuje dle Ae 5375/DOK. Rev.3 | | | | |
| Poznámky: Notes: Bemerkungen: | | | | |
| Zkoušel / Operator: Prüfer: | | Kval. stupeň / Level: Qualifikation: | | Schválil / Approved: Genehmigt: |
| Šisler M. | | II dle EN 473 | | Šisler M. |
| Datum: Date: Datum: | | Místo zkoušky: Examination: Prüfungsort: | | |
| 20.3.2015 | | ZVU Kovárna a.s. Hradec Králové | | |

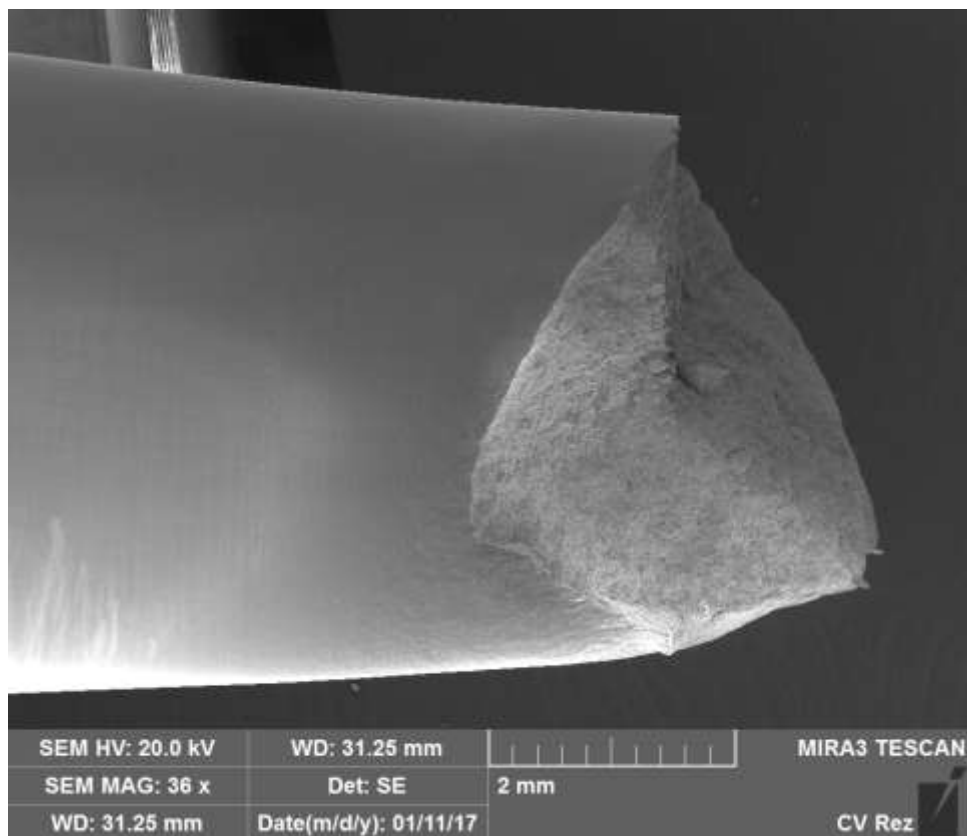


| | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|
|  | | ZVU Kovárna a.s. Pražská 322, P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové | | OSVĚDČENÍ O TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ BESCHEINIGUNG ÜBER WÄRMEBEHANDLUNG CERTIFICATE OF HEAT TREATMENT СЕРТИФИКАТ О ТЕРМООБРАБОТКЕ Die / Nach / To / Dla EN 10204 / 3.1 | |
| Číslo / Nr. / No. / Номер: 2015/094 | | Datum / Date / Дата: 8.2.2015 | | | |
| Kupující / Kunde / Customer / Заказчик | | Škoda JS a.s. | | | |
| Zakázkové číslo / Bestelungs Nr. / MFGR's Job No. / Заказной номер | | KS-14/1905 | | | |
| Běžné číslo / Lid. Nr. / Serial No. // Množství / Menge / Quantity | | 3344 / 1-3 KS | | | |
| Číslo objednávky / Auftrags Nr. / Order No. | | 4902/BQ/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 | | NAČ.3344/KOV | | | |
| Materiál / Material / Материал // Tavná / Schmelze / Heat / Плавка | | 08CH18N10T / 474322 | | | |
| Návodka č. / Vorgehensweise Nr. / Procedure No. / Инструкция №. | | | | | |
| Číslo pece / Ofen Nr. / Furnace No. / Но. печи | | Vozová žhací pec P175 | | | |
| DIAGRAM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ DIAGRAM DER WÄRMEBEHANDLUNG HEAT TREATMENT DIAGRAM ДИАГРАММА ТЕРМООБРАБОТКИ | | | | | |
|  | | | | | |
| Způsob tepelného zpracování / Art der Wärmebehandlung / Method of Treatment / Способ термообработки | | | | | |
| Austenitizace / Lösungsglühen / Solution Annealing | | | | | |
| Způsob ochlazování / Art der Abkühlung / Method of cooling / Способ охлаждения | | | | | |
| Voda / Wasser / Watter | | | | | |
| Hodnoty tvrdosti / Hodnoty tvrdosti / Hardness test / Величины твердости | | | | | |
| po tepelném zpracování / nach Wärmebehandlung / after heat treatment | | | | | |
| Typ přístroje / Type des Gerätes / Type of instrument / Тип аппарата | | | | | |
| Brinell (HBW 10/3000) | | | | | |
| Základní materiál / Grund material / Base Material / Основной материал | | | | | |
| Přechodové pásmo / Übergangsgebiet / H. A. Z. / Зона терм. влияния | | | | | |
| Svarový kov / Schweissgut / Weld material / Наплав. 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 be required: (AD-Merkblatt HP 7/1 Abz. 3.) | | | | | |
| Die gestellten Anforderungen sind erfüllt Manufacturing requirements are satisfied | | | | | |
| Vystavil / dne Ausgestellt von / am Prepared by / date Выпущен / дня | ZVU Kovárna a.s. Pražská 322 501 47 Hradec Králové IČ: 63217554 | | Kontroloval / dne Überprüft von / am Approved by / date Проверил / дня | ZVU Kovárna a.s. Pražská 322 501 47 Hradec Králové IČ: 63217554 | |
| | | | | 20-02-2015 | |

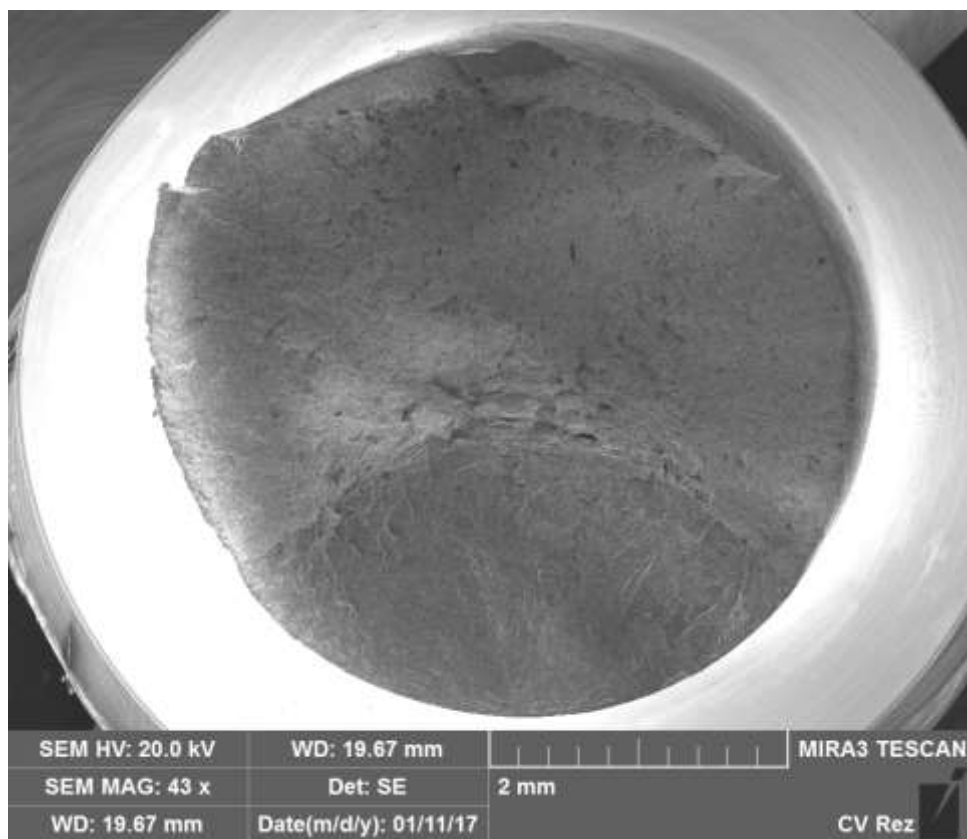
| | | | |
|--|---|---|--|
|  ZVU Kovárna a.s. Pražská 322, P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové | | OSVĚDČENÍ O TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ BESCHEINIGUNG ÜBER WÄRMEBEHANDLUNG CERTIFICATE OF HEAT TREATMENT СЕРТИФИКАТ О ТЕРМООБРАБОТКЕ Die / Nach / To / Для EN 10204 / 3.1 | |
| Číslo / Nr. / No. / Номер: 2015/095 | | Datum / Date / Дата: 10.2.2015 | |
| Kupující / Kunde / Customer / Заказчик | | Škoda JS a.s. | |
| Zakázkové číslo / Bestelungs Nr. / MFG'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 | |
| Material / Material / Material // Tavná / Schmelze / Heat / Плавка | | 08CH18N10T / 474322 | |
| Návodka č. / Vorgehensweise Nr. / Procedure No. / Инструкция ИО. | | | |
| Číslo pece / Ofen Nr. / Furnace No. / Но. печи | | Vozová žhací pec P175 | |
| DIAGRAM TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ DIAGRAM DER WÄRMEBEHANDLUNG HEAT TREATMENT DIAGRAM ДИАГРАММА ТЕРМООБРАБОТКИ | | | |
|  | | | |
| Způsob tepelného zpracování / Art der Wärmebehandlung / Method of Treatment / Способ термообработки | | | |
| Austenitizace / Lösungsglühen / Solution Annealing | | | |
| Způsob ochlazování / Art der Abkühlung / Method of cooling / Способ охлаждения | | | |
| Voda / Wasser / Watter | | | |
| Hodnoty tvrdosti / Hodnoty tvrdosti / Hardness test / Величины твердости | | | |
| po tepelném zpracování / nach Wärmebehandlung / after heat treatment | | | |
| Typ přístroje / Type des Gerätes / Type of instrument / Тип аппарата | | | |
| Brinell (HBW 10/3000) | | | |
| Základní materiál / Grund material / Base Material / Основной материал | | | |
| Přechodové pásmo / Übergangsgebiet / H. A. Z. / Зона терм. влияния | | | |
| Svarový kov / Schweissgut / Weld material / Наплав. металл | | | |
| Poznámky / Anmerkungen / Notes / Примечания: | | | |
| Zařízení pro tepelné zpracování bylo přezkoušeno dle předpisu: Anlage für Wärmebehandlung wurde überprüft nach: | | (AD-Merkblatt HP 7/1 Abz. 3. | |
| Device for Heat treatment was approved as may by required: | | | |
| Die gestellten Anforderungen sind erfüllt Manufacturing requirements are satisfied | | | |
| Vystavil / dne Ausgestellt von / am Prepared by / date Выписан / дня | ZVU Kovárna a.s. dne 16.2.2015 Pražská 322 P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové 46-00010014 | Kontroloval / dne Überprüft von / am Approved by / date Проверил / дня | ZVU Kovárna a.s. OKJ - s.c. s.r.l. techn. 1 Pražská 322 P.O.Box 21 501 47 Hradec Králové 46-00010014 |



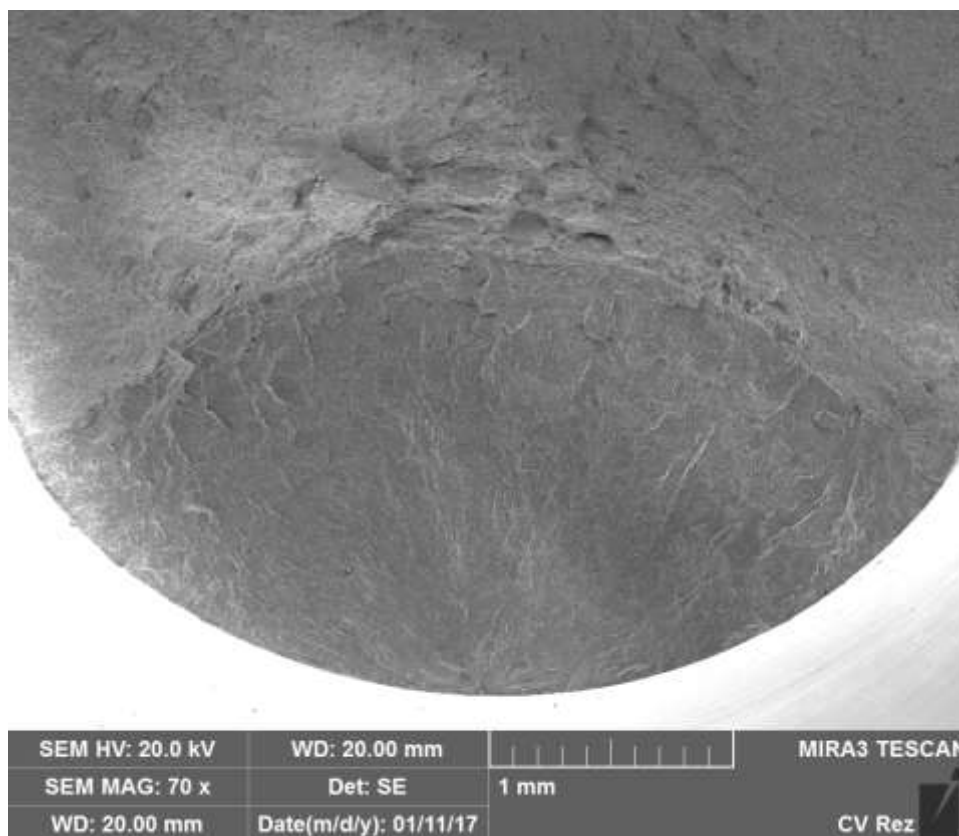
12.3 Fraktografická analýza zkušebního tělesa Z19



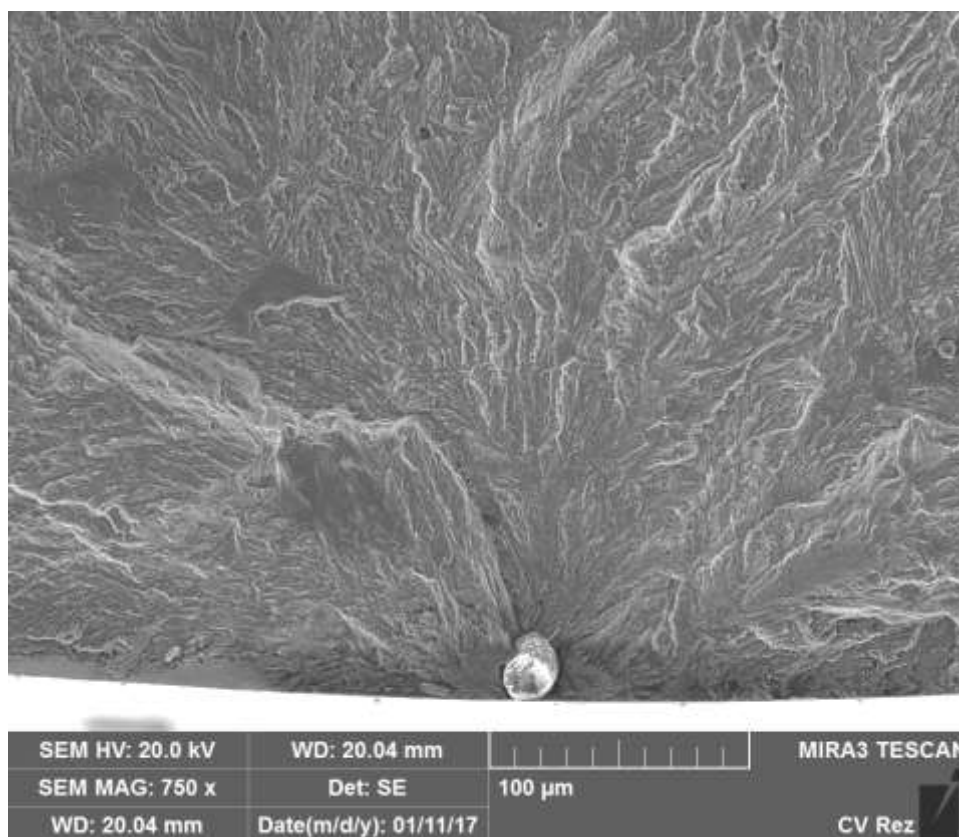
Obr. 12.3-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



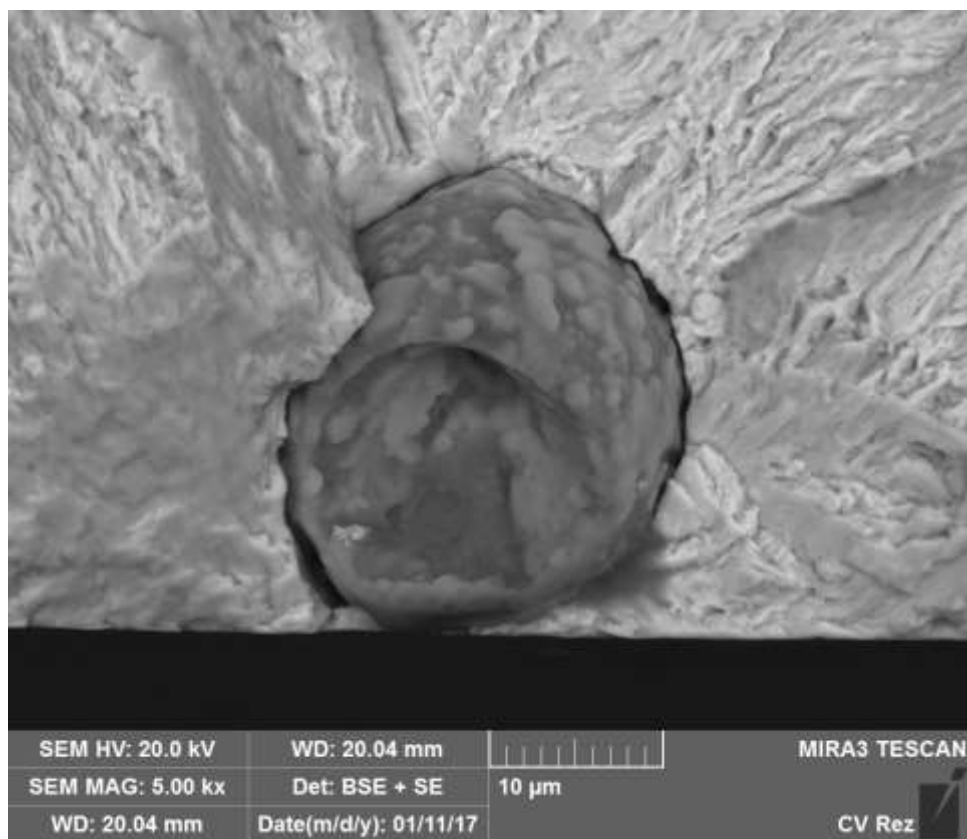
Obr. 12.3-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



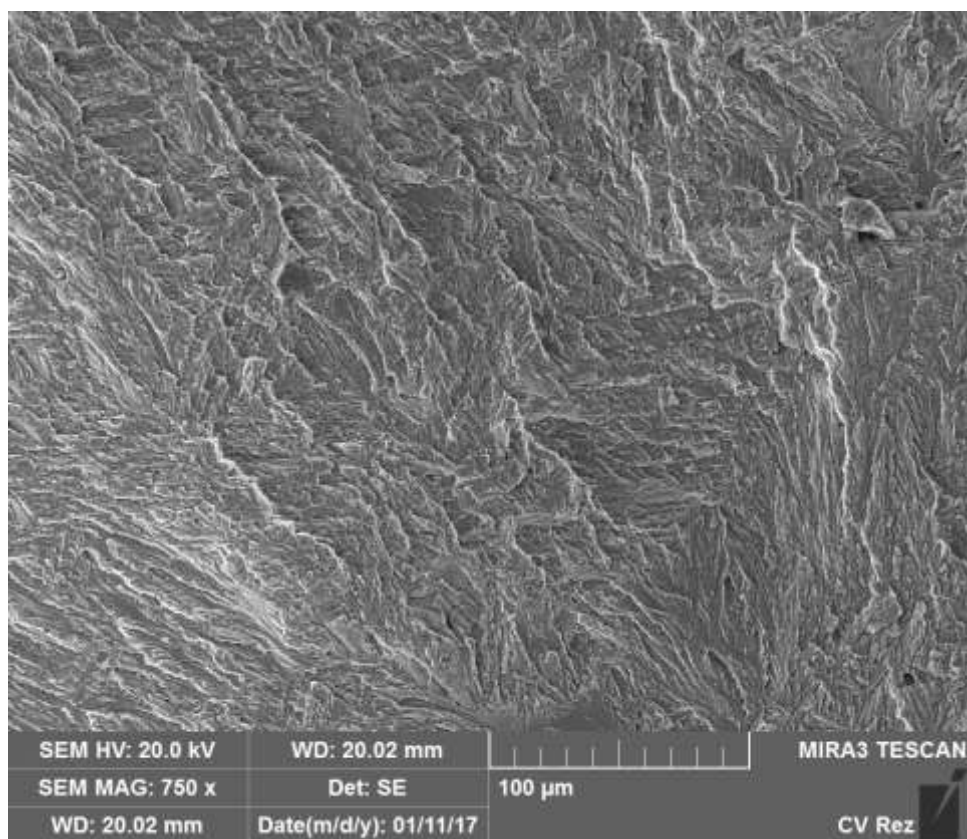
Obr. 12.3-3 Plocha únavové trhliny



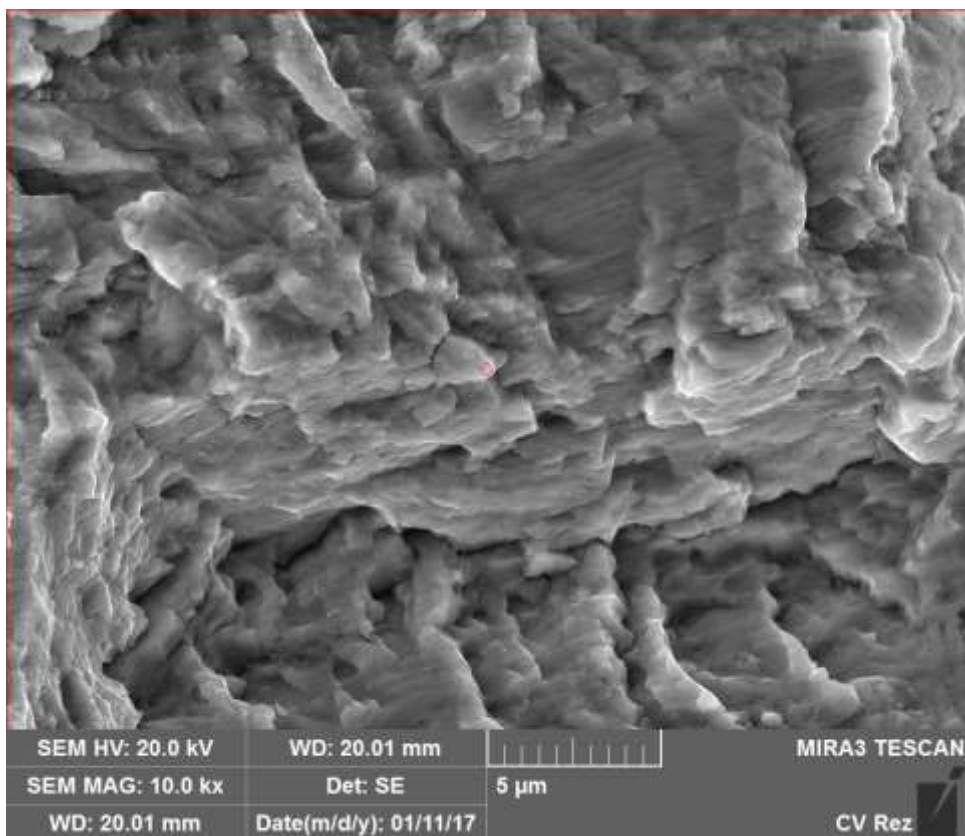
Obr. 12.3-4 Oblast LP u ohniska



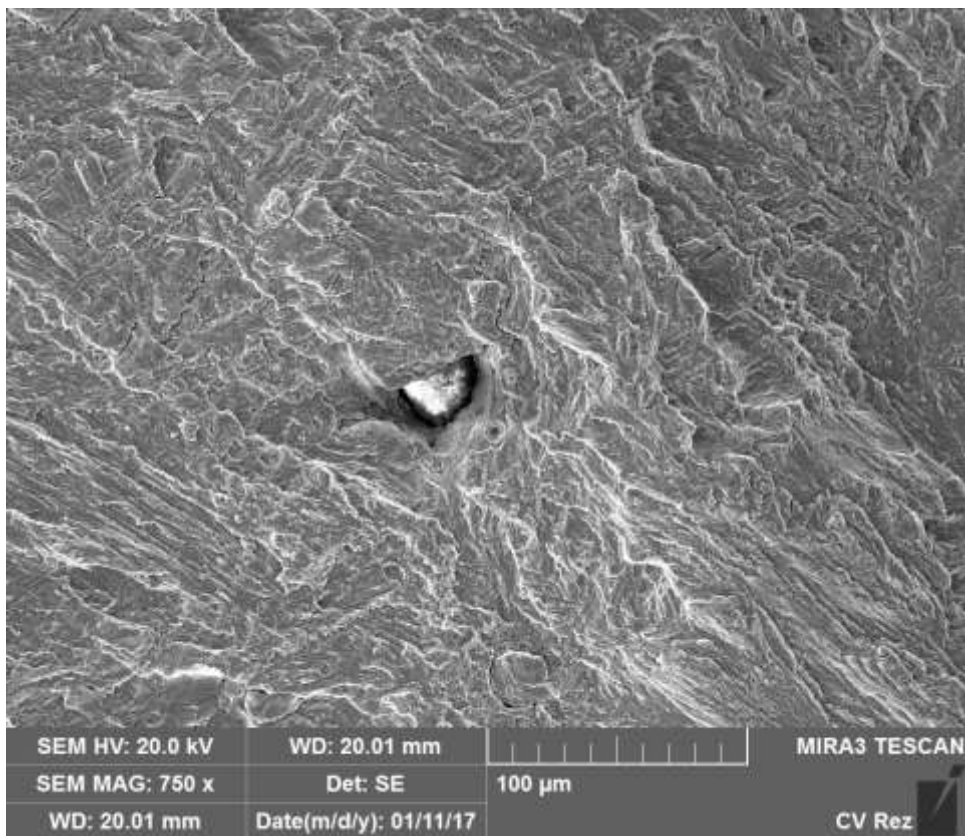
Obr. 12.3-5 Ohnisko



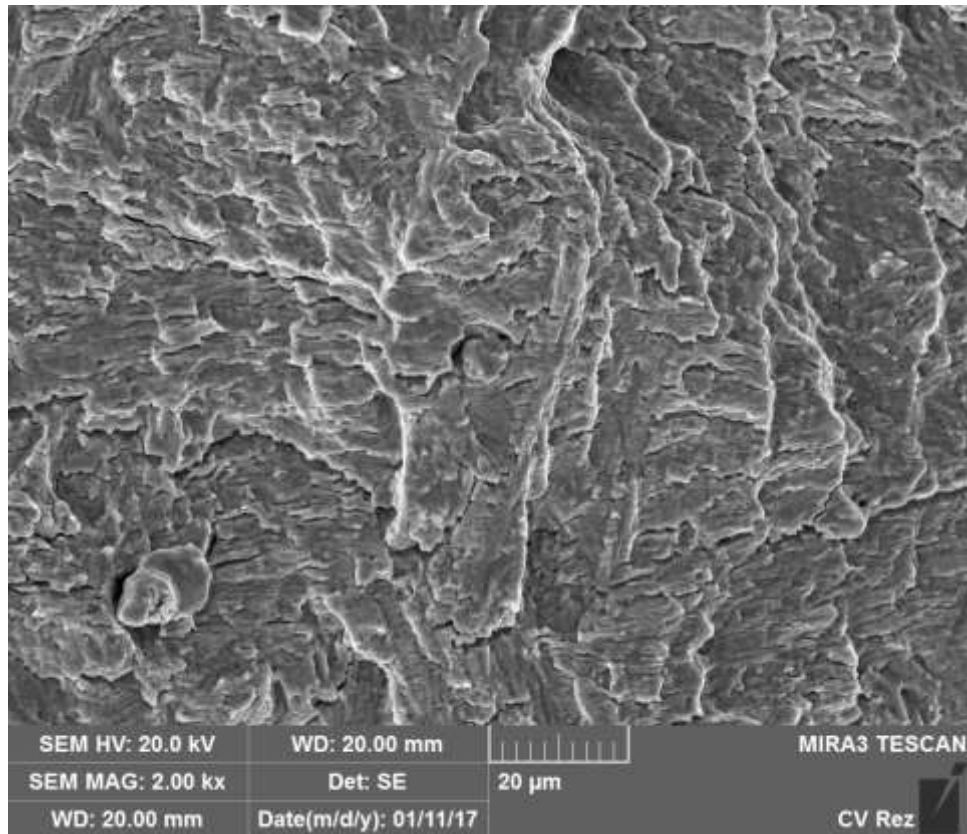
Obr. 12.3-6 0,38 mm od ohniska



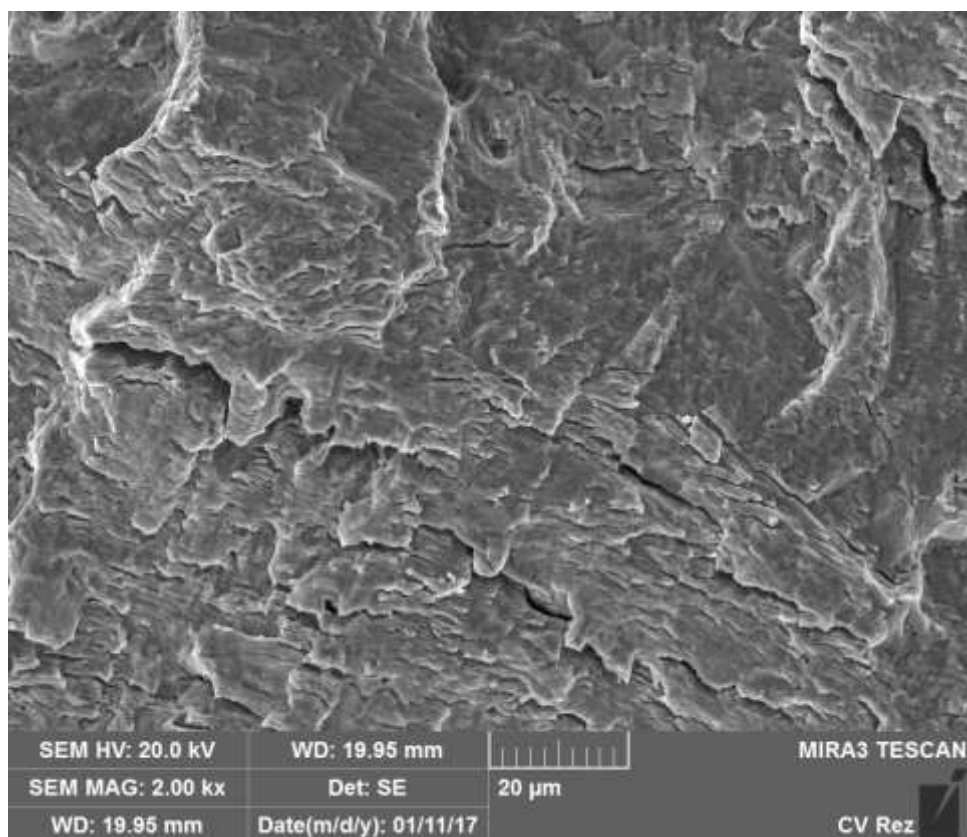
Obr. 12.3-7 0,38 mm od ohniska, 10000x



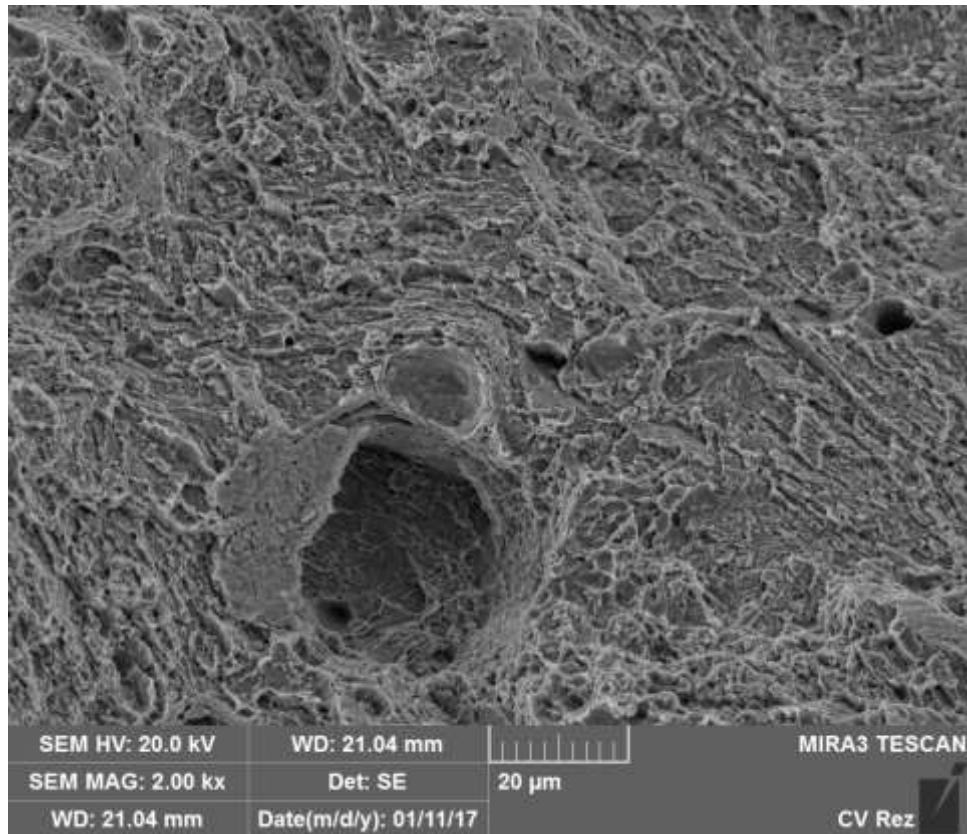
Obr. 12.3-8 0,75 mm od ohniska



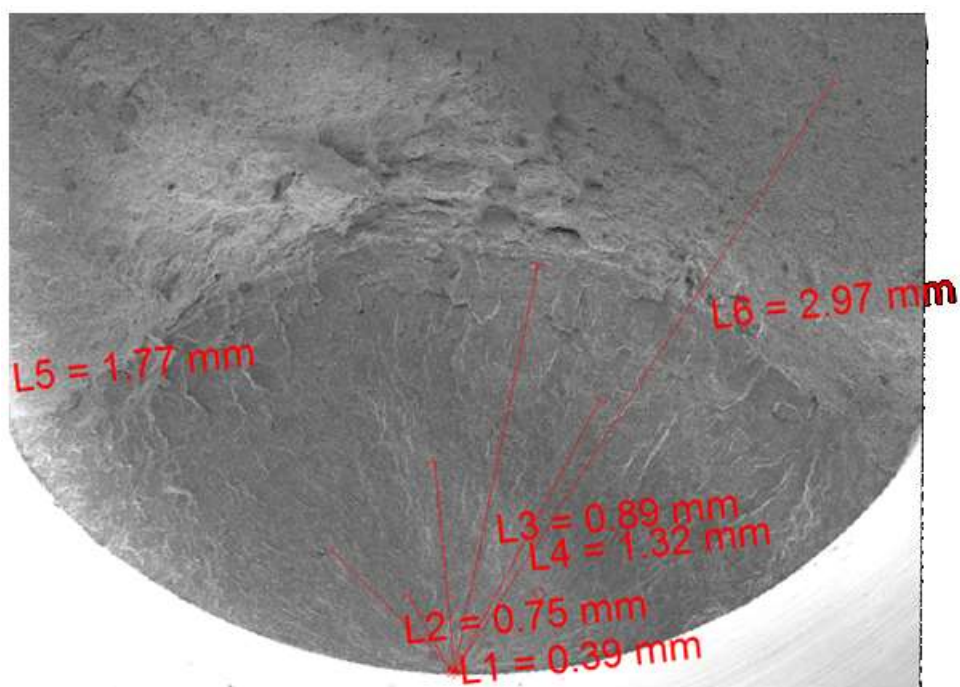
Obr. 12.3-9 0,89 mm od ohniska, 2000x



Obr. 12.3-10 1,32 mm od ohniska, 2000x

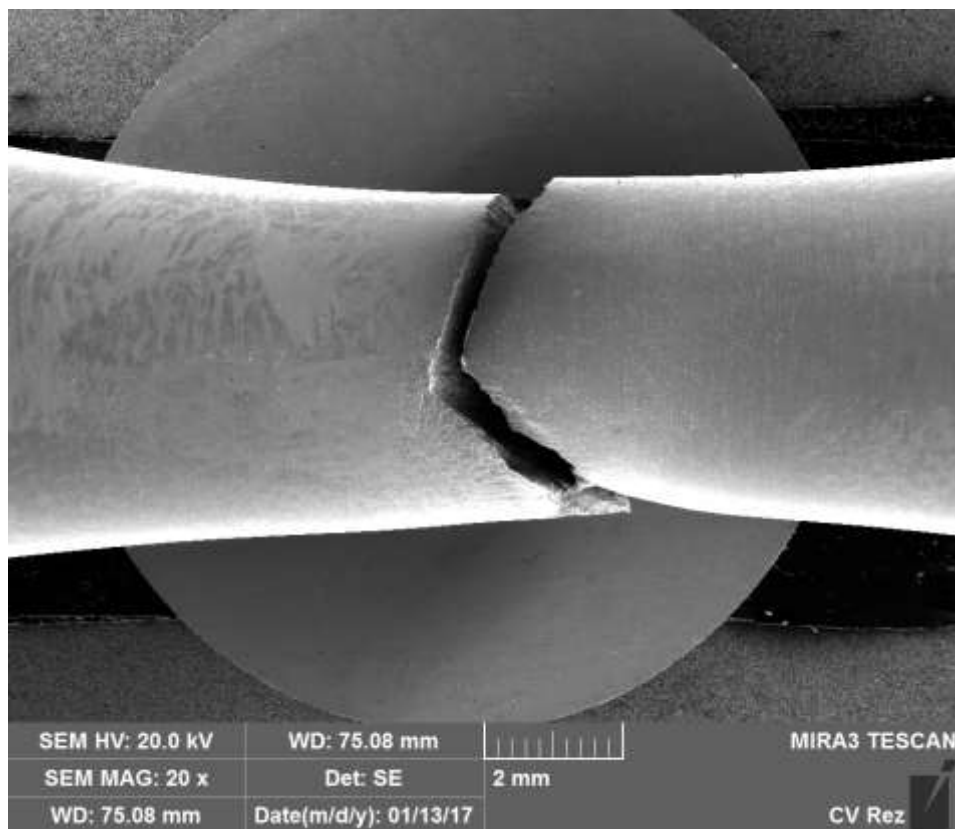


Obr. 12.3-11 Tvárné dolomení, 2000x

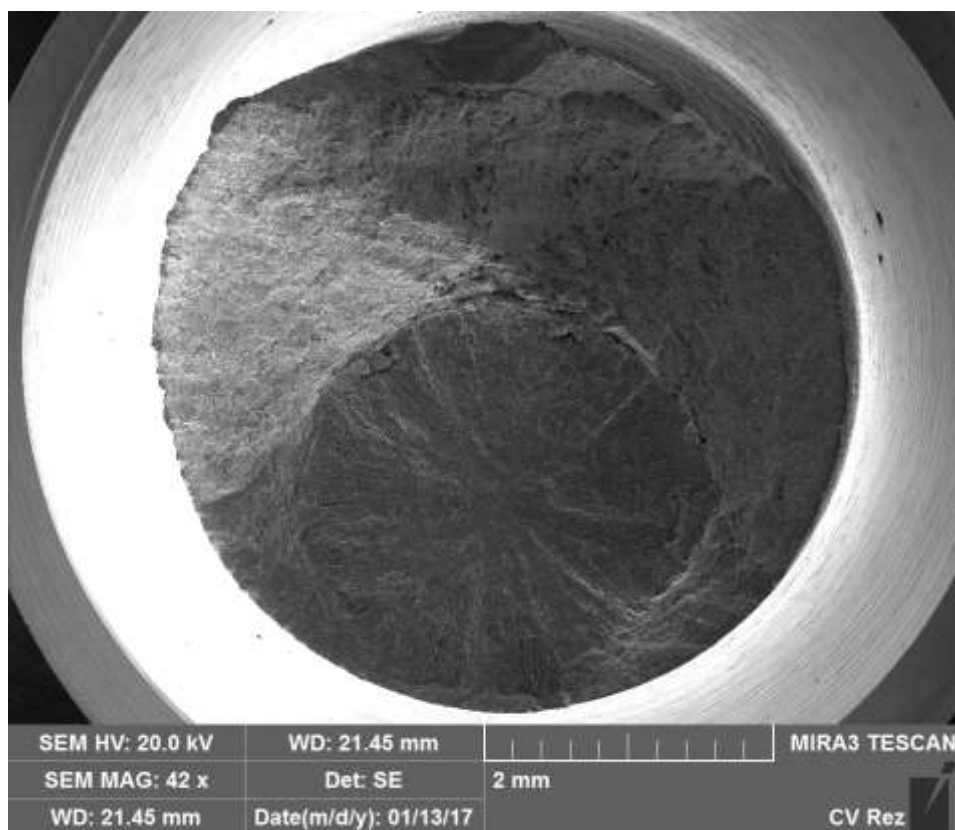


Obr. 12.3-12 Přehled dokumentovaných oblastí LP od ohniska

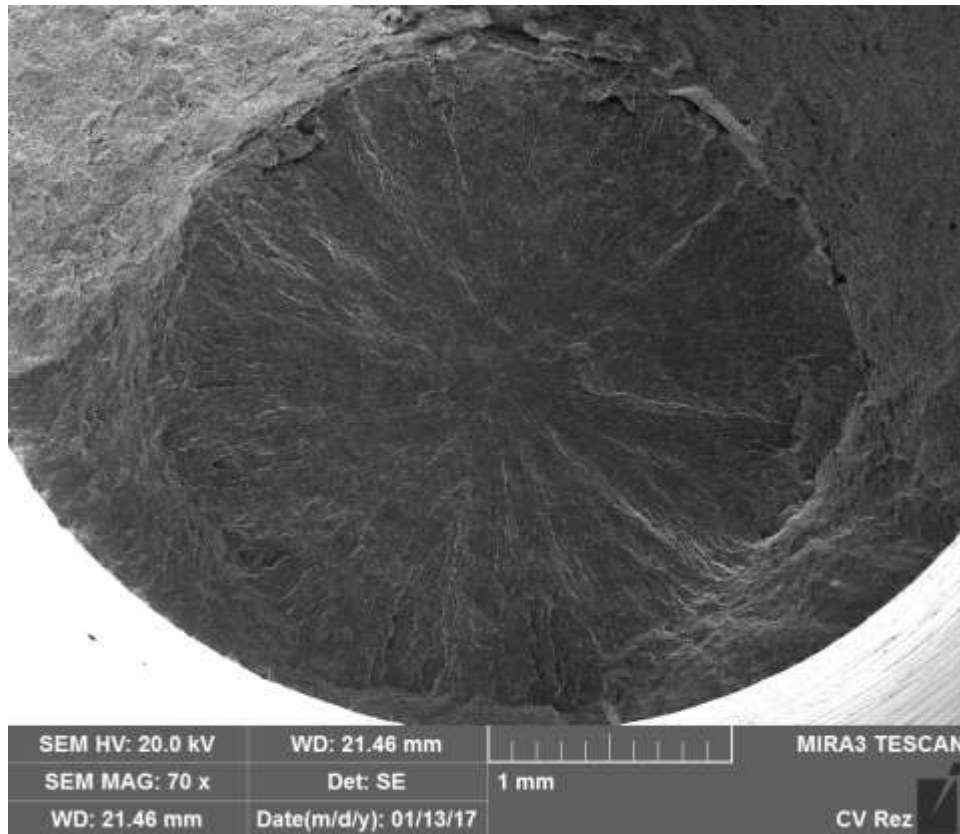
12.4 Fraktografická analýza zkušebního tělesa Z32



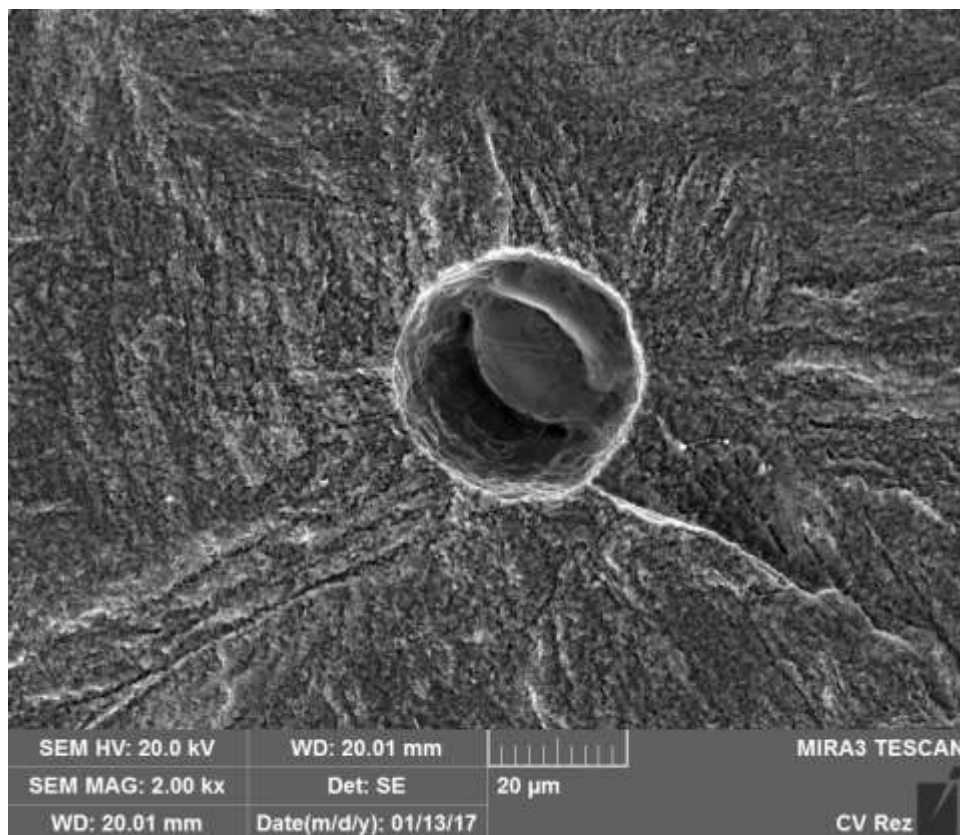
Obr. 12.4-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



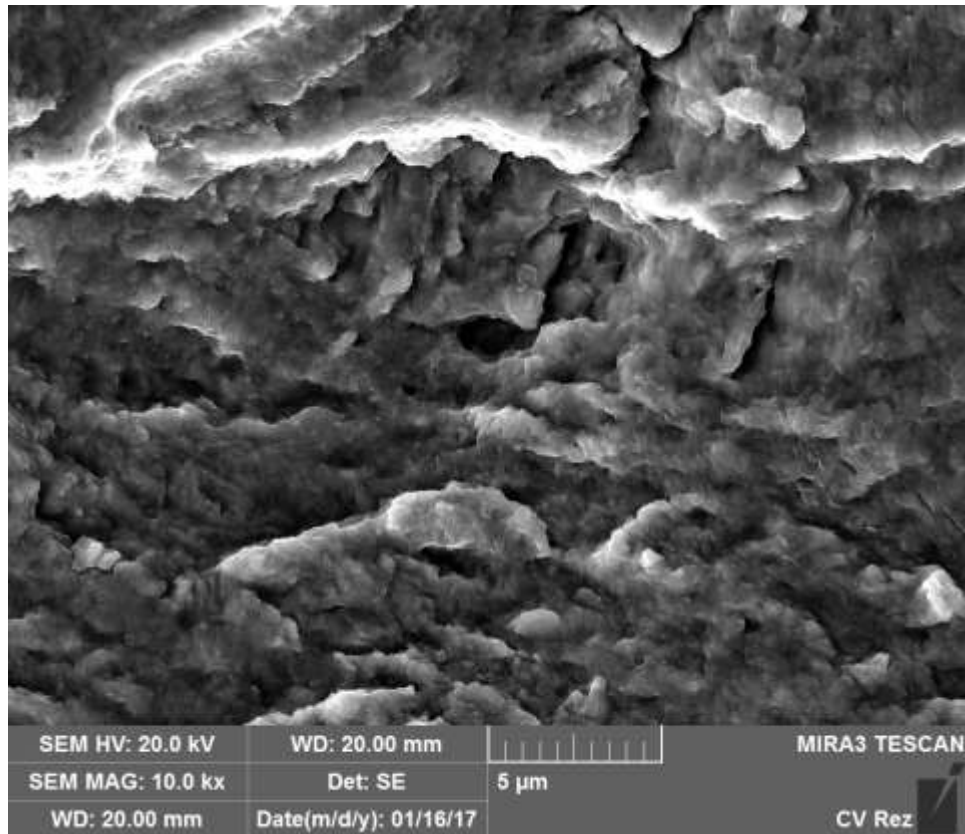
Obr. 12.4-2 Přehledový snímek LP celého ZT v příčném směru



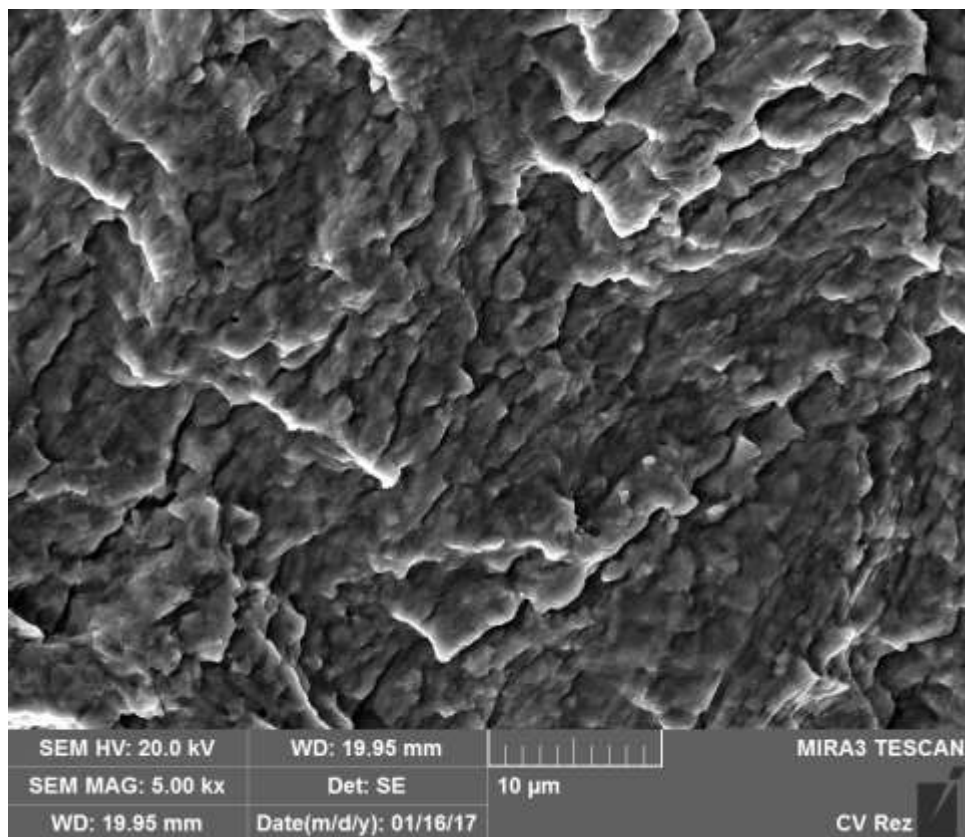
Obr. 12.4-3 Oblast únavové trhliny



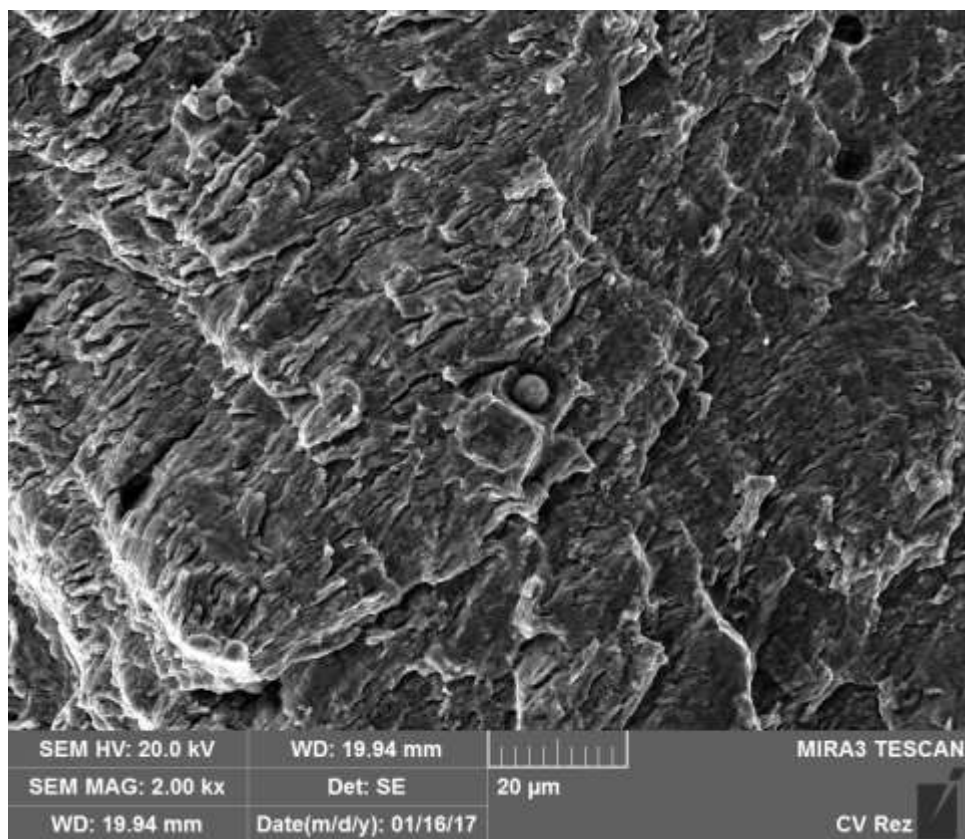
Obr. 12.4-4 Oblast u ohniska 2000x



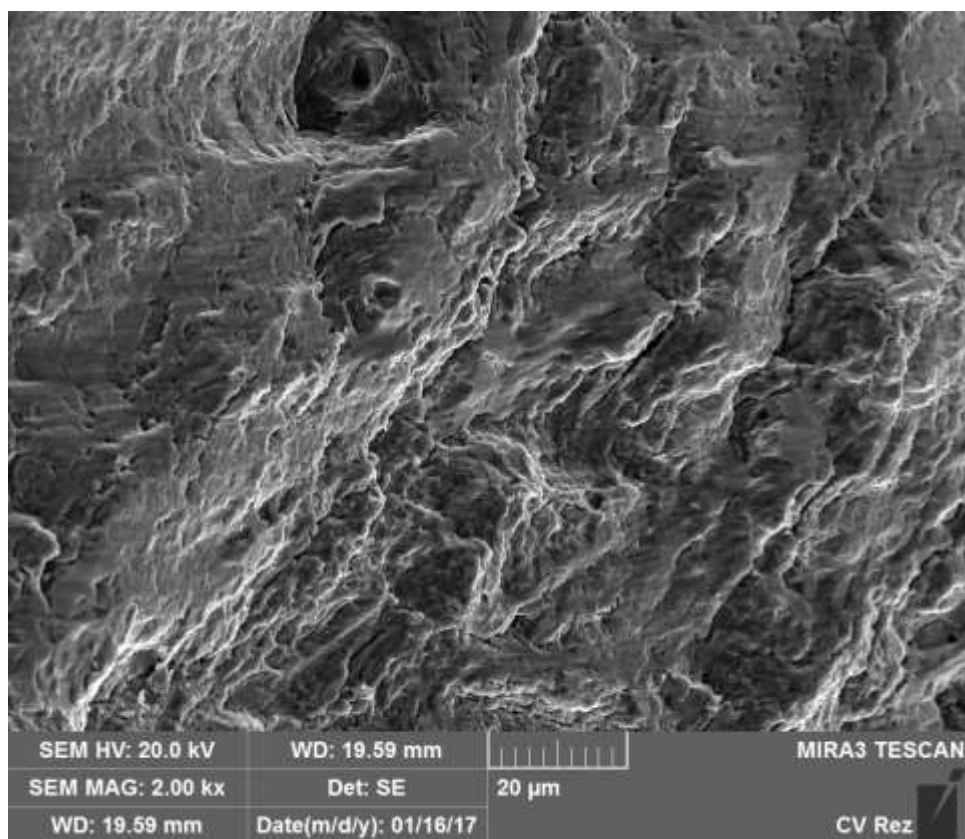
Obr. 12.4-5 0,31 mm od ohniska, 10000x



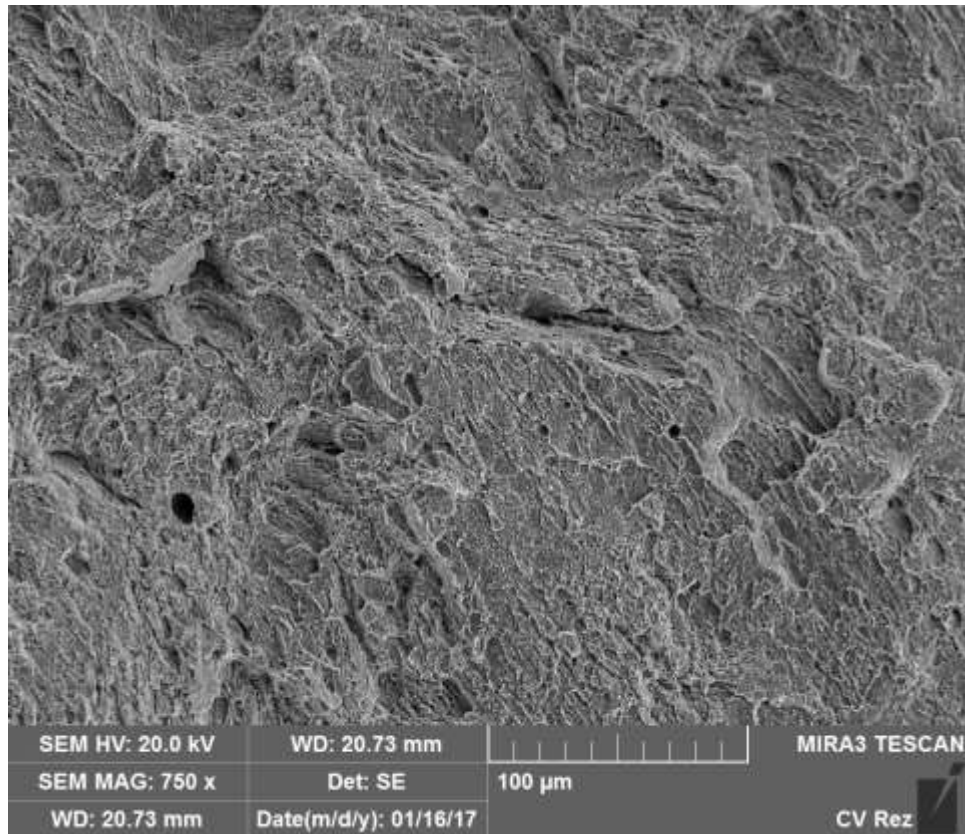
Obr. 12.4-6 0,78 mm od ohniska, 5000x



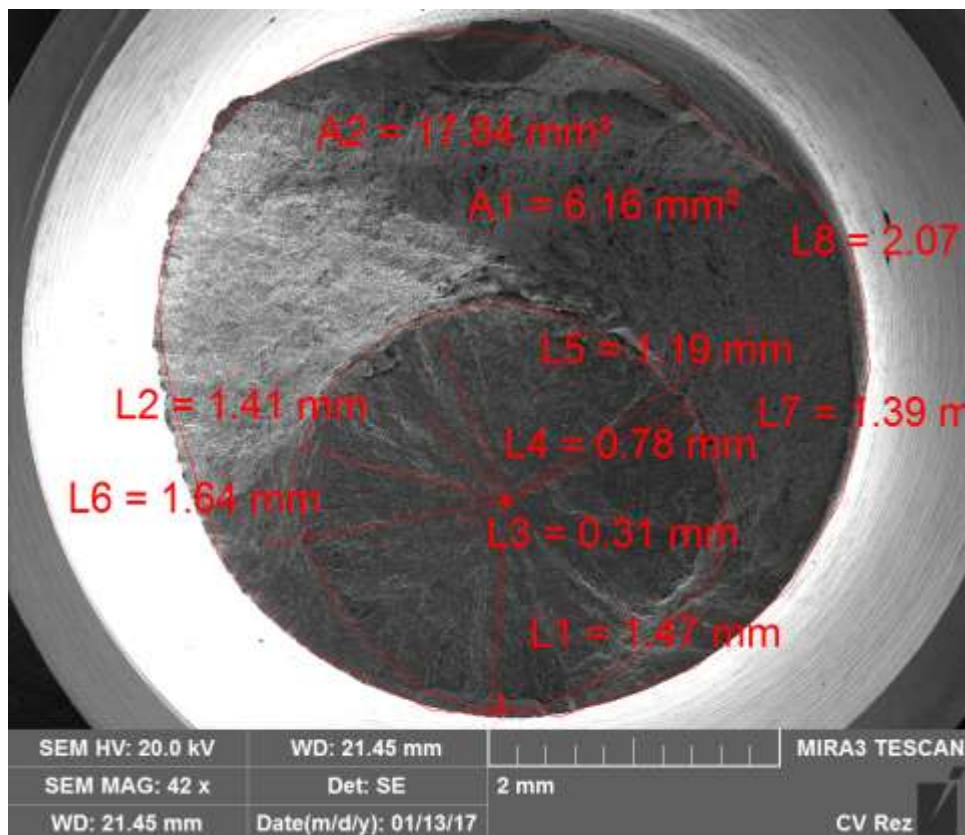
Obr. 12.4-7 1,19 mm od ohniska, 2000x



Obr. 12.4-8 1,64 mm od ohniska, hranice mezi trhlinou a dolomem, 2000x

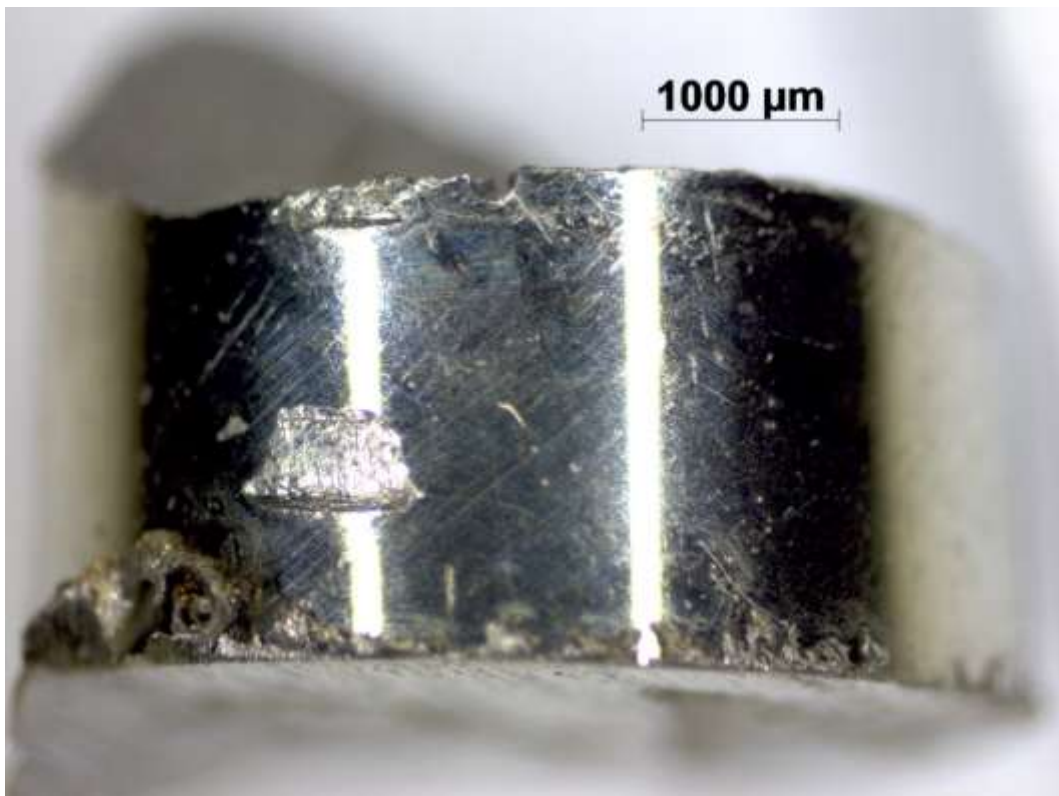


Obr. 12.4-9 Dolom,750x

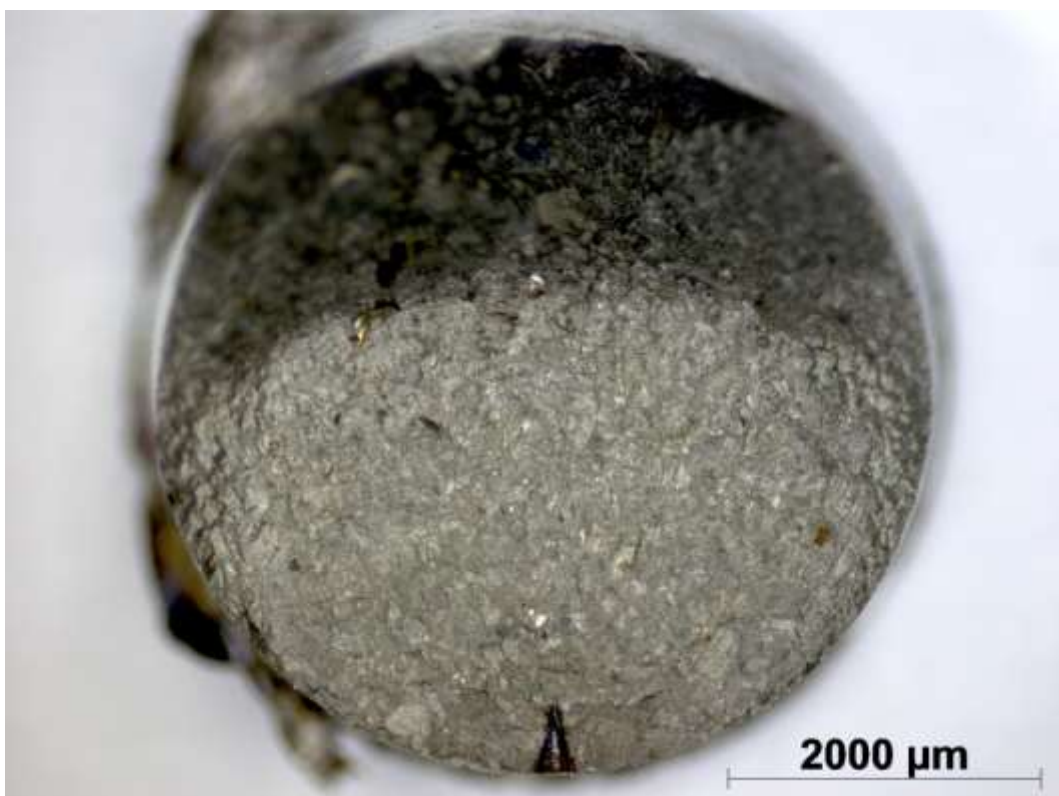


Obr. 12.4-10 Přehled dokumentovaných oblastí LP od ohniska

12.5 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 3



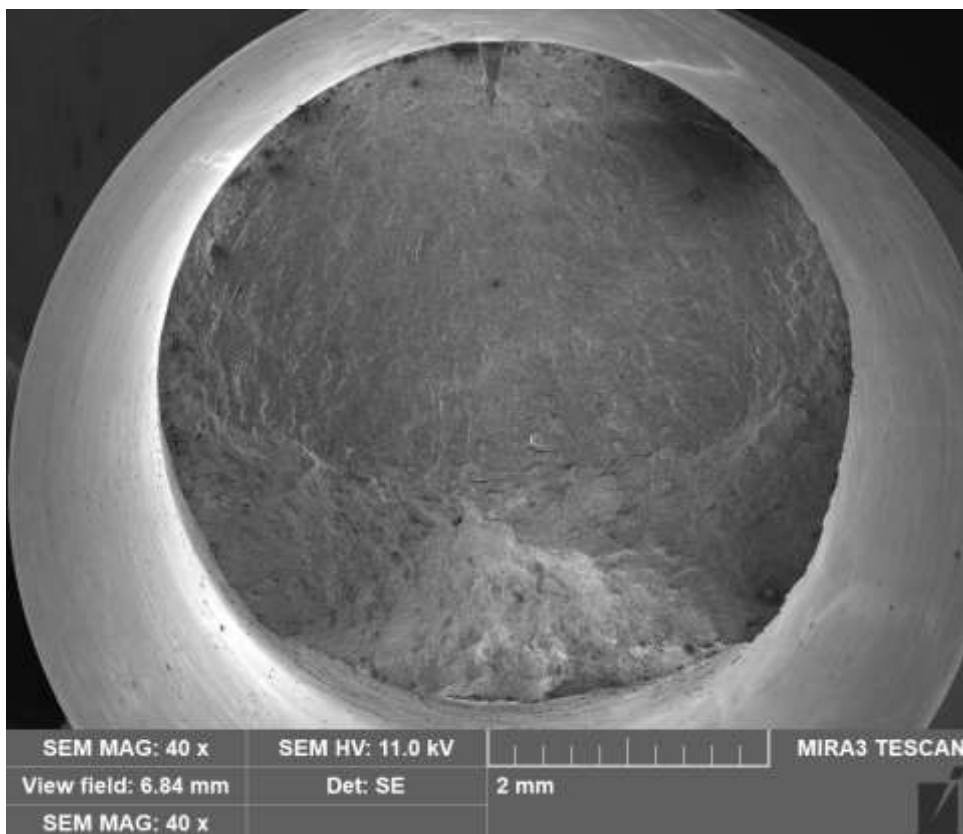
Obr. 12.5-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



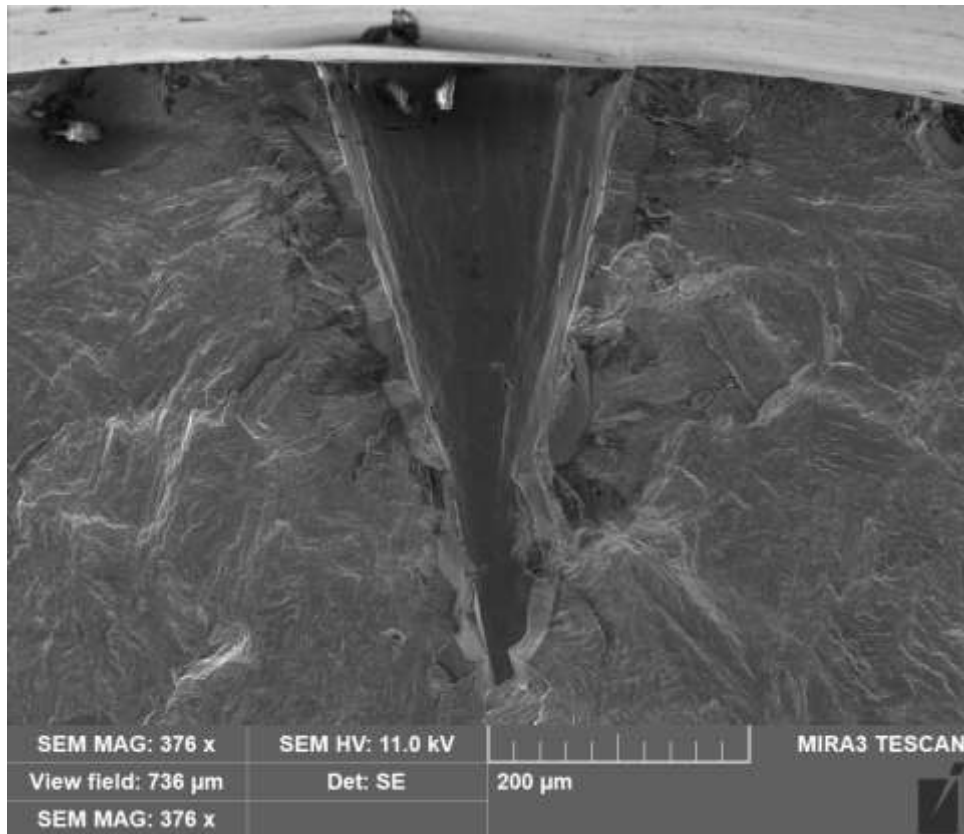
Obr. 12.5-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



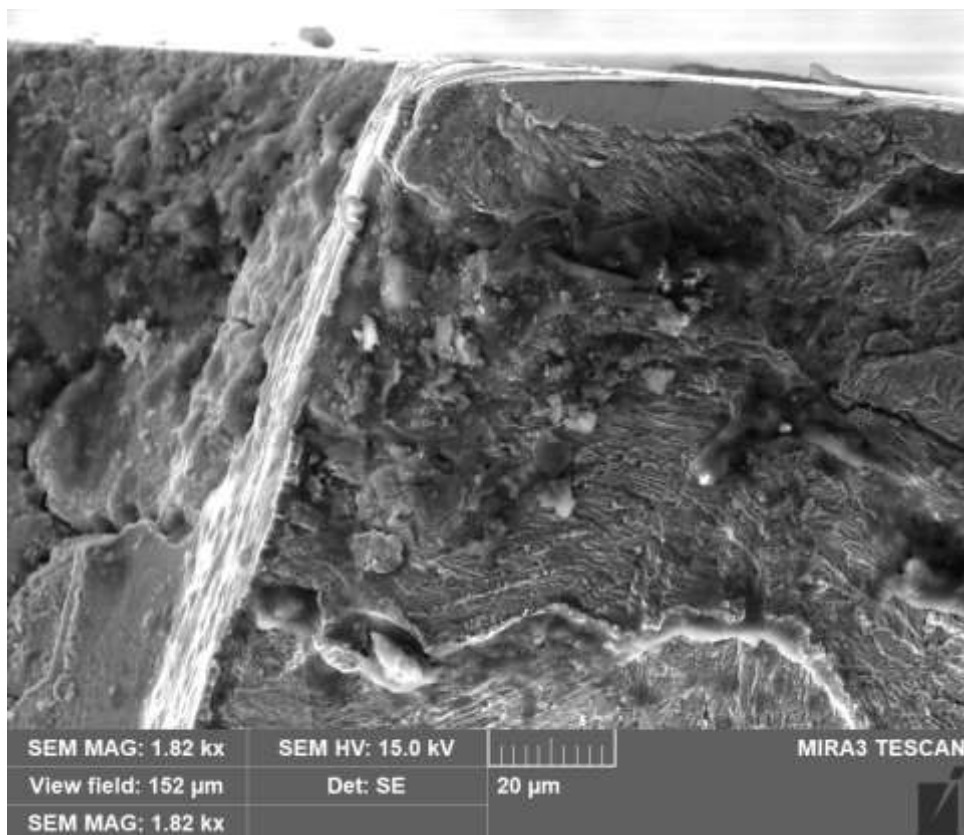
Obr. 12.5-3 Lomová plocha s vrubem



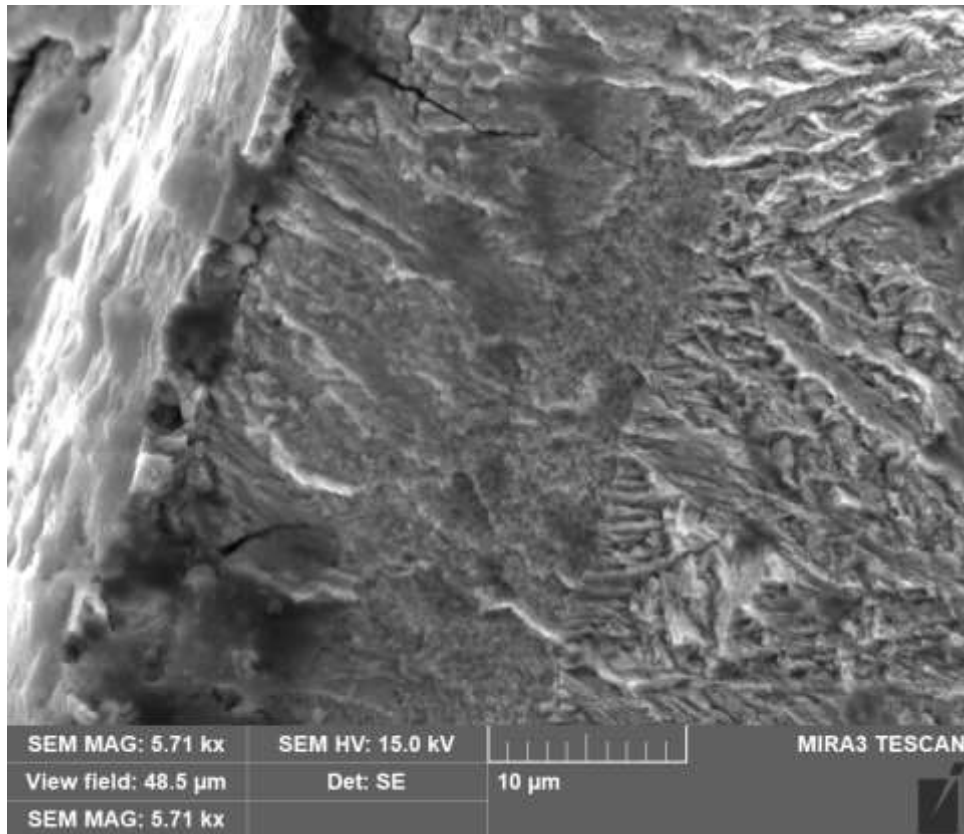
Obr. 12.5-4 Lomová plocha celého ZT



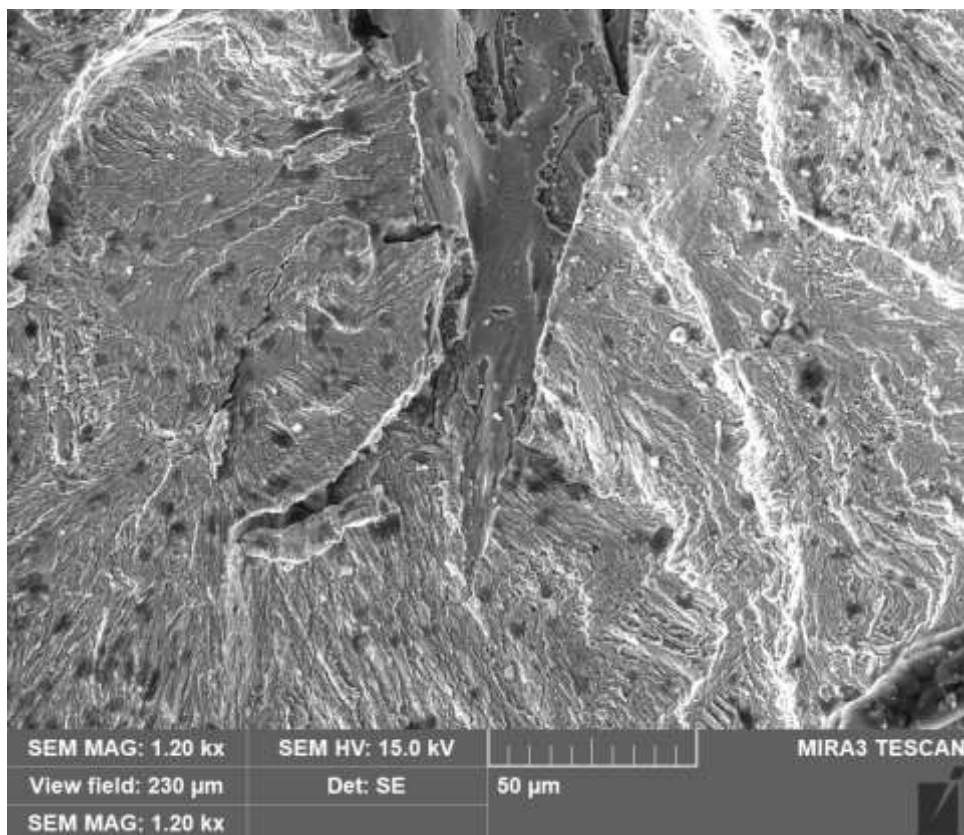
Obr. 12.5-5 detail vrubu



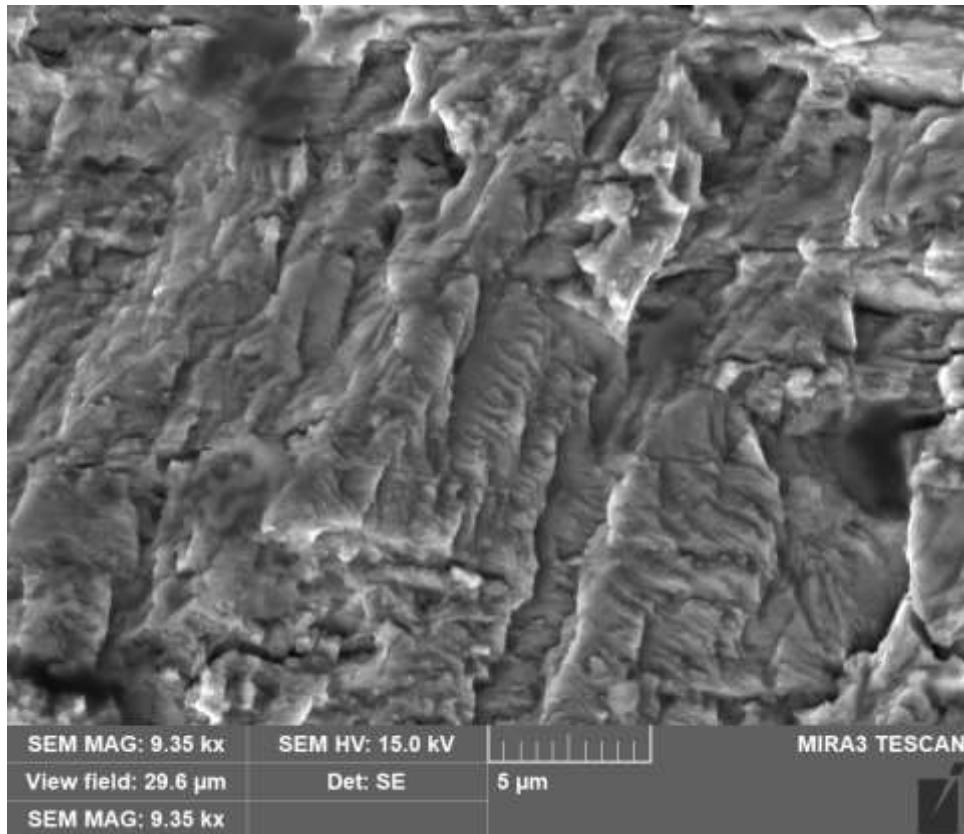
Obr. 12.5-6 detail hrany vrubu



Obr. 12.5-7 detail bokul vrubu

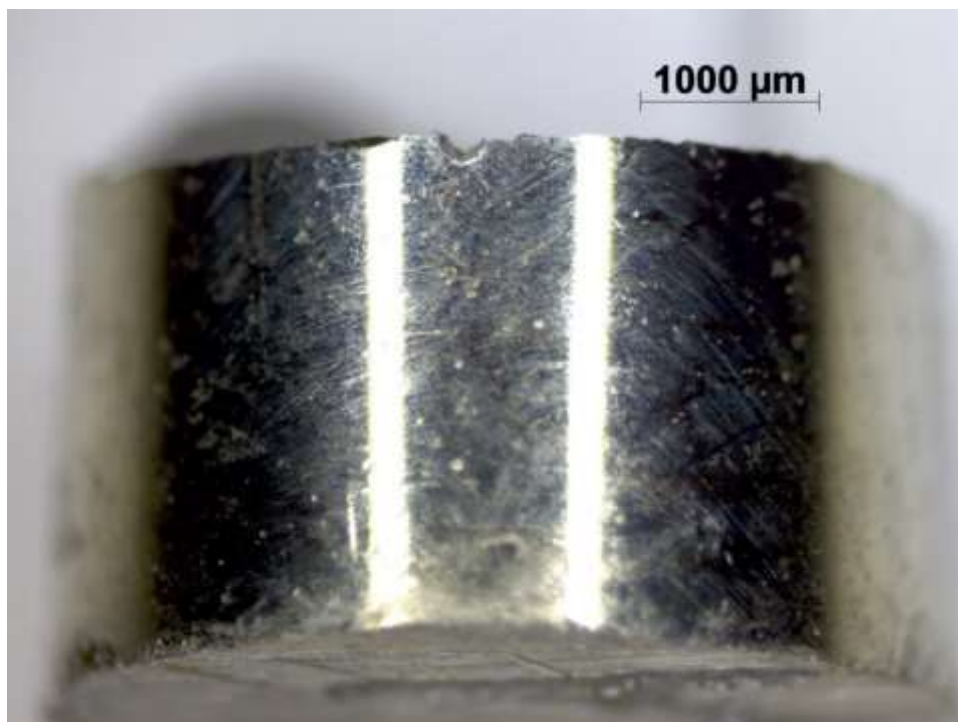


Obr. 12.5-8 detail kořene vrubu

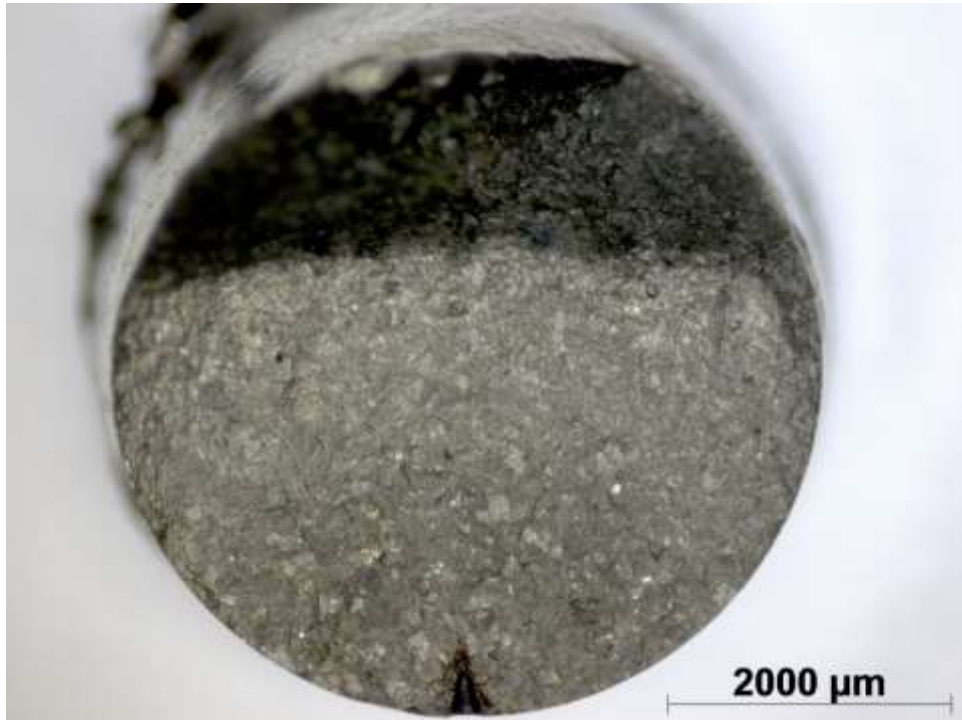


Obr. 12.5-9 Striační linie 0,8 mm od ohniska

12.6 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 6



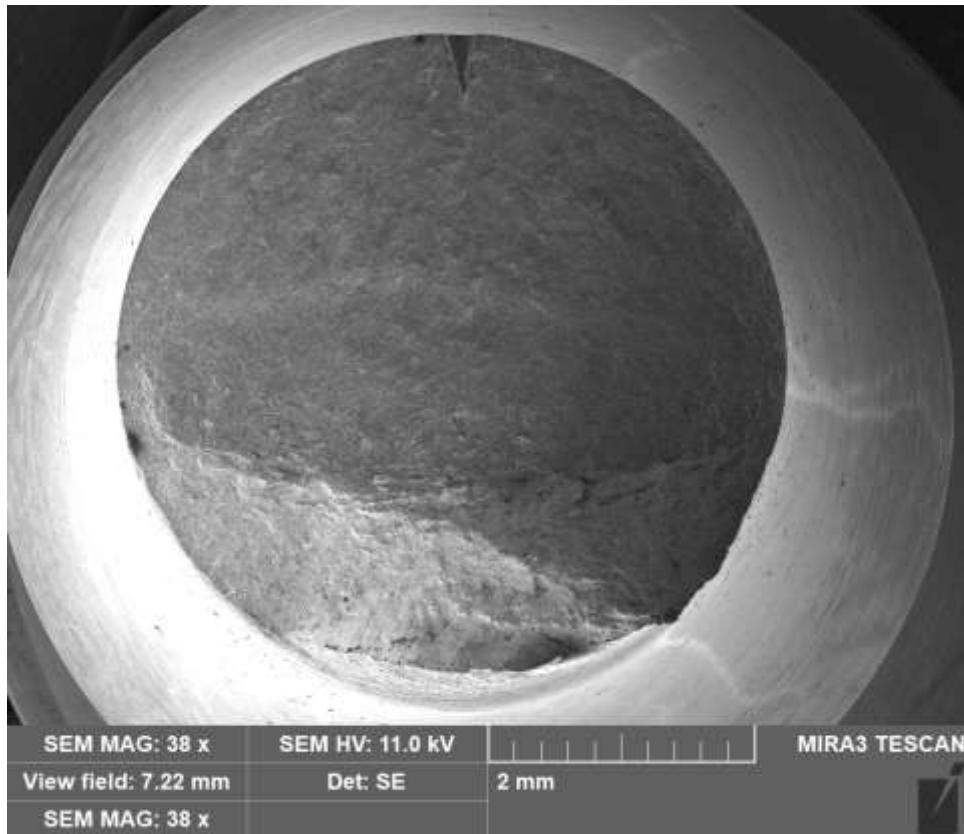
Obr. 12.6-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



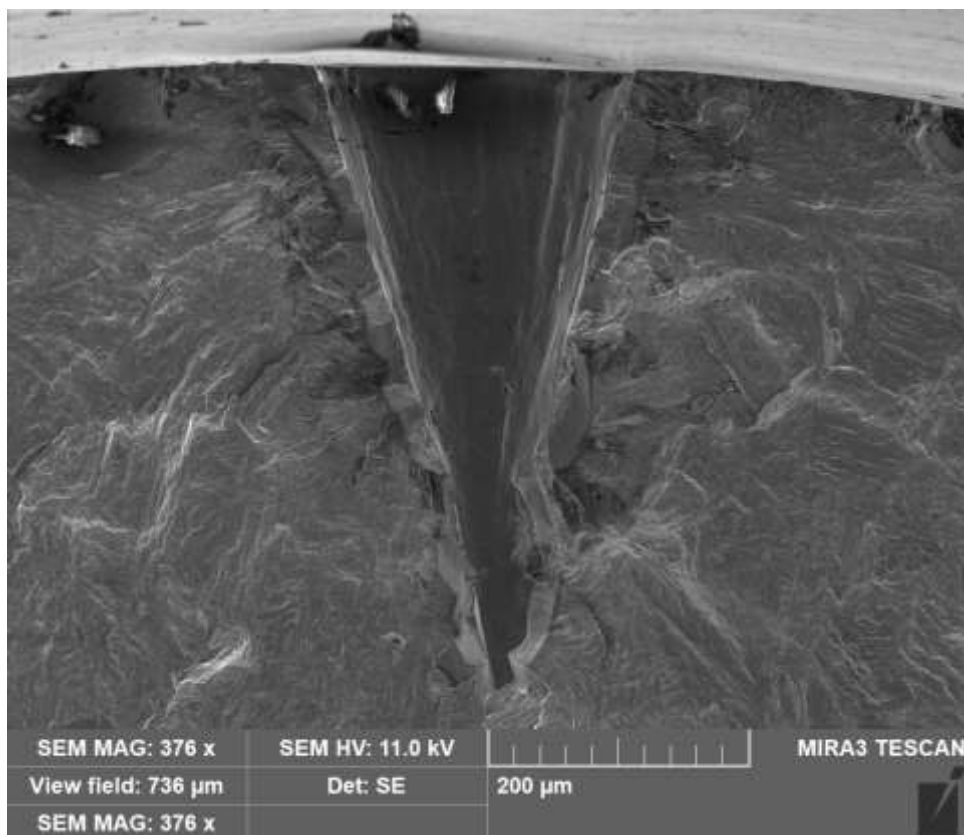
Obr. 12.6-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



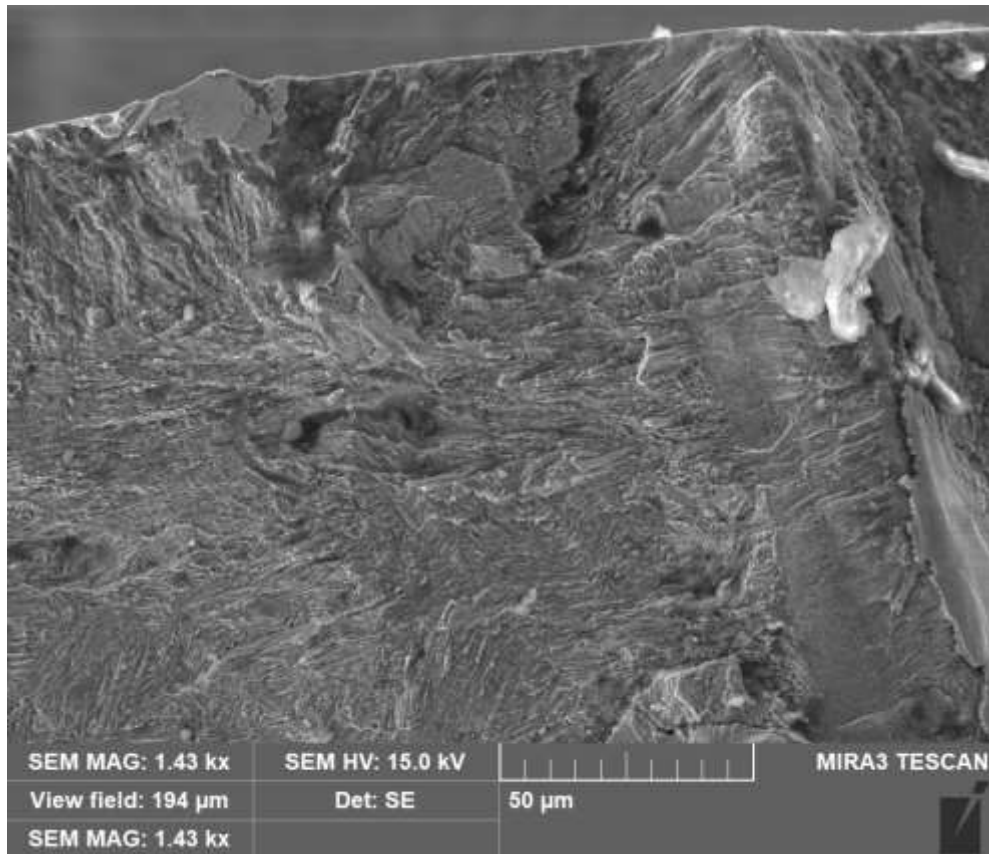
Obr. 12.6-3 Lomová plocha s vrubem



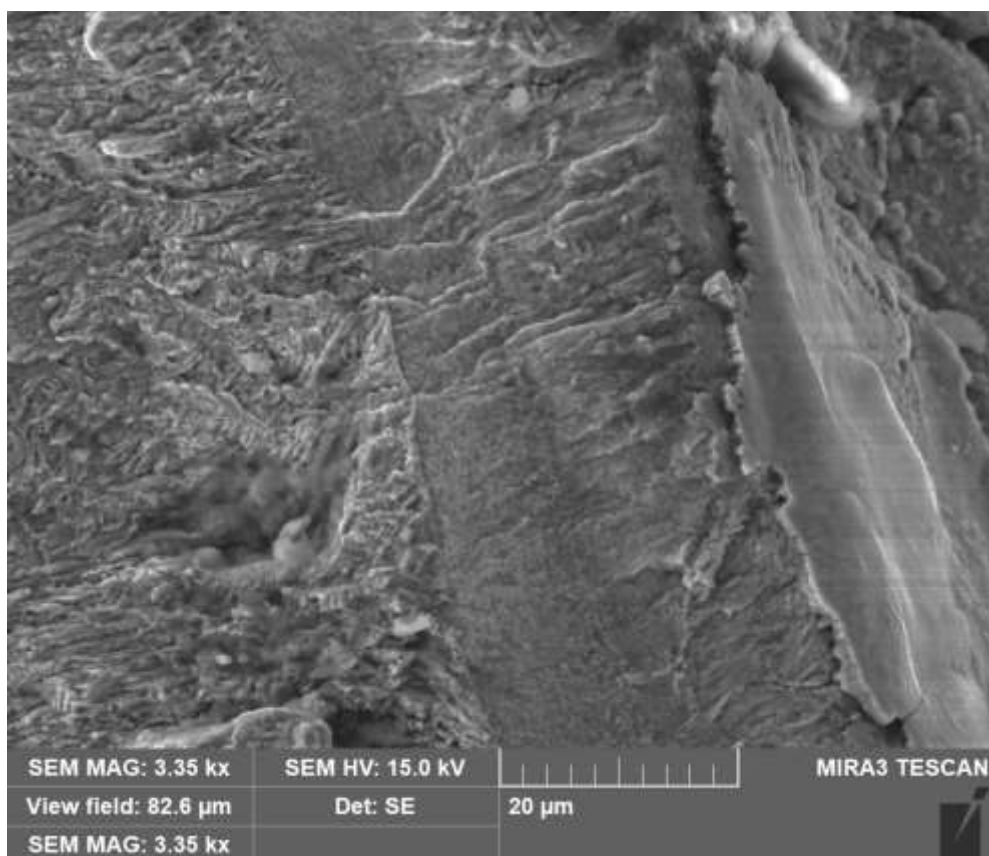
Obr. 12.6-4 Lomová plocha celého ZT



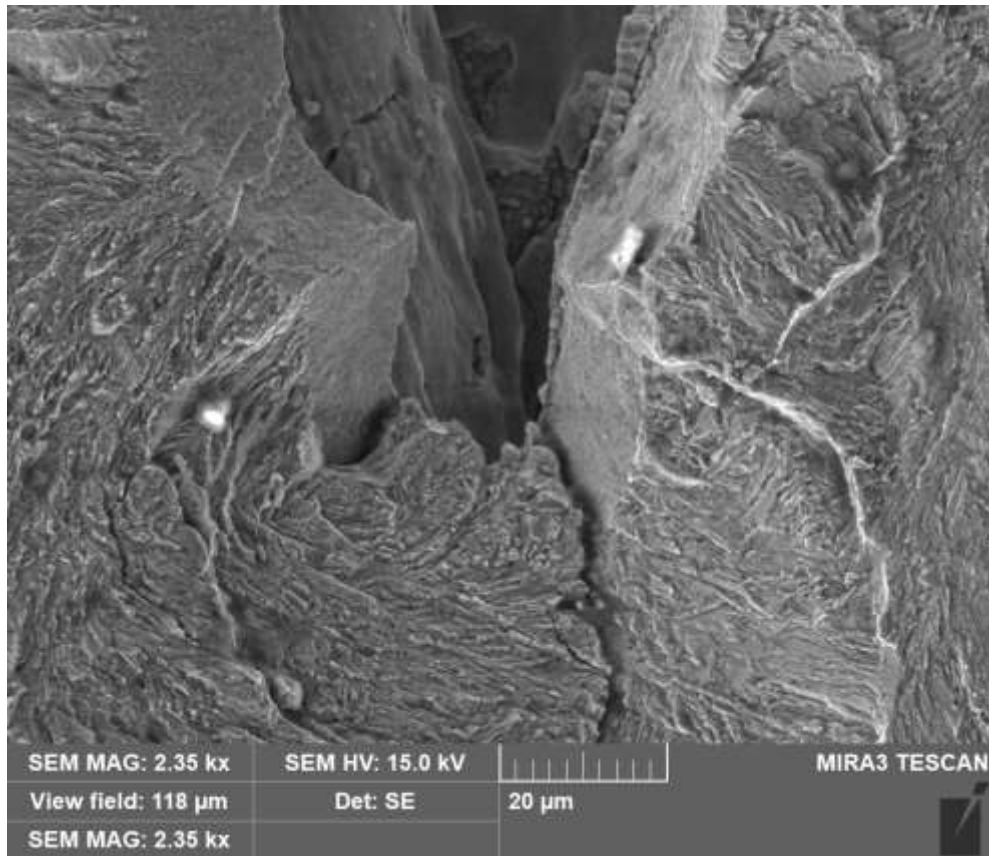
Obr. 12.6-5 detail vrubu



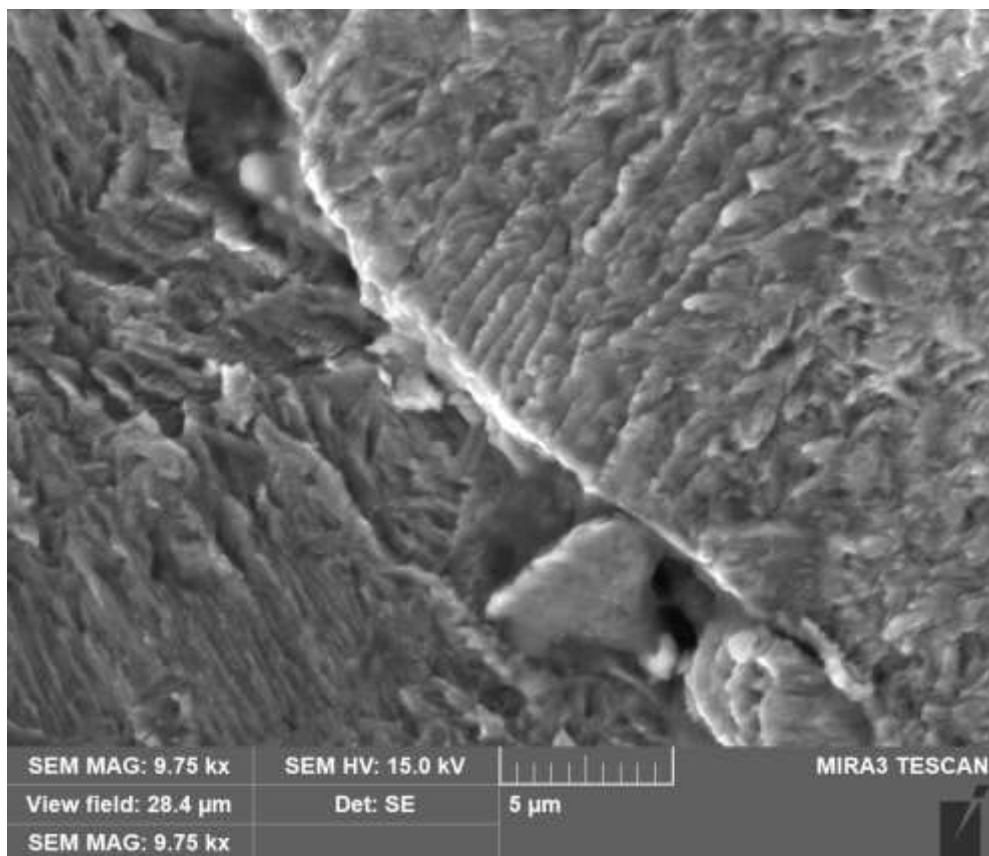
Obr. 12.6-6 hrana vrubu



Obr. 12.6-7 bok vrubu

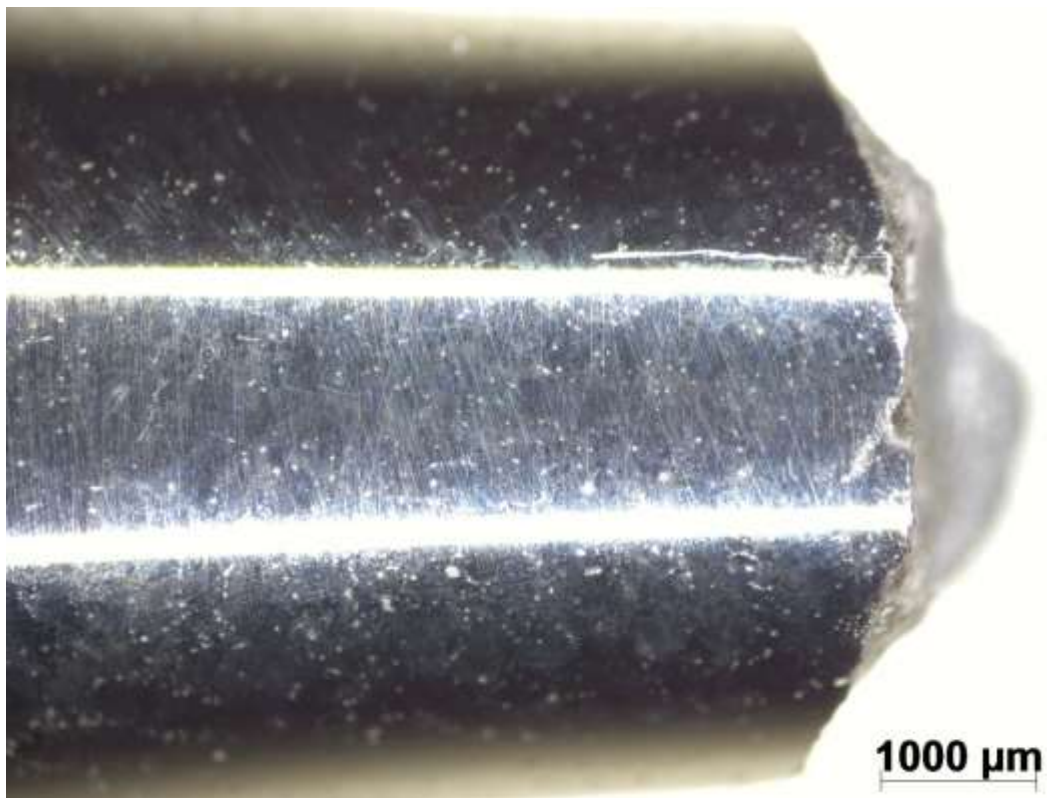


Obr. 12.6-8 kořen vrubu



Obr. 12.6-9 striční linie 0,5mm od ohniska

12.7 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 23



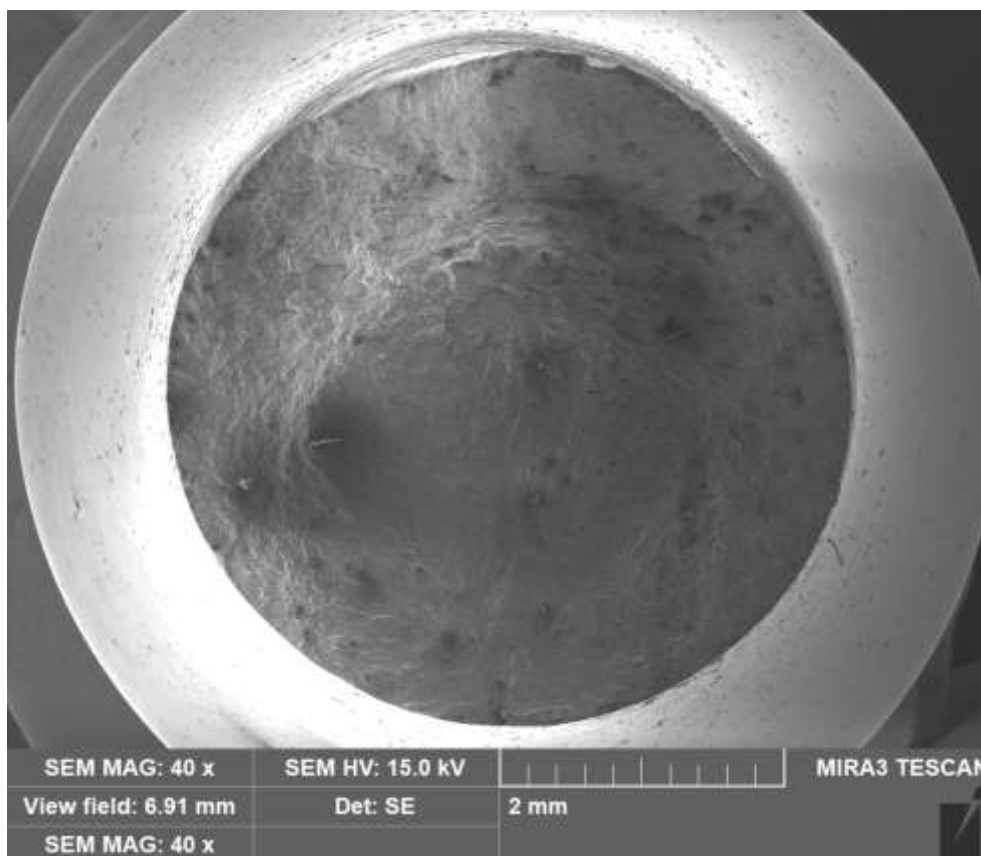
Obr. 12.7-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



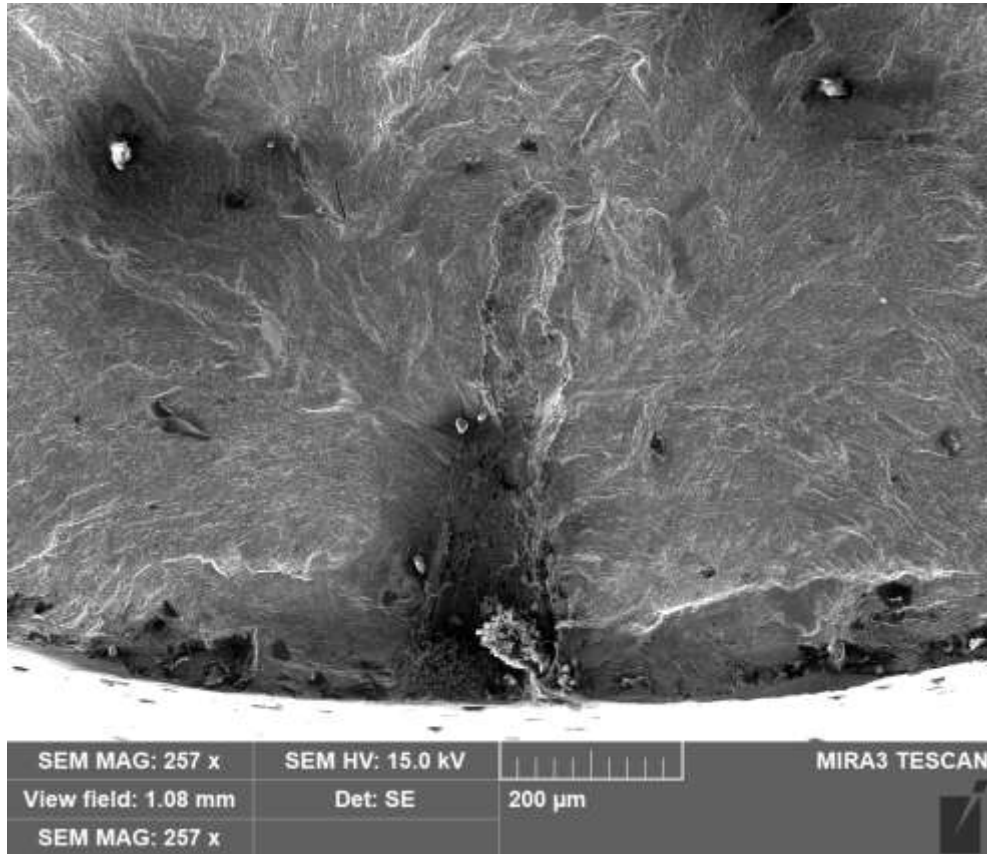
Obr. 12.7-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



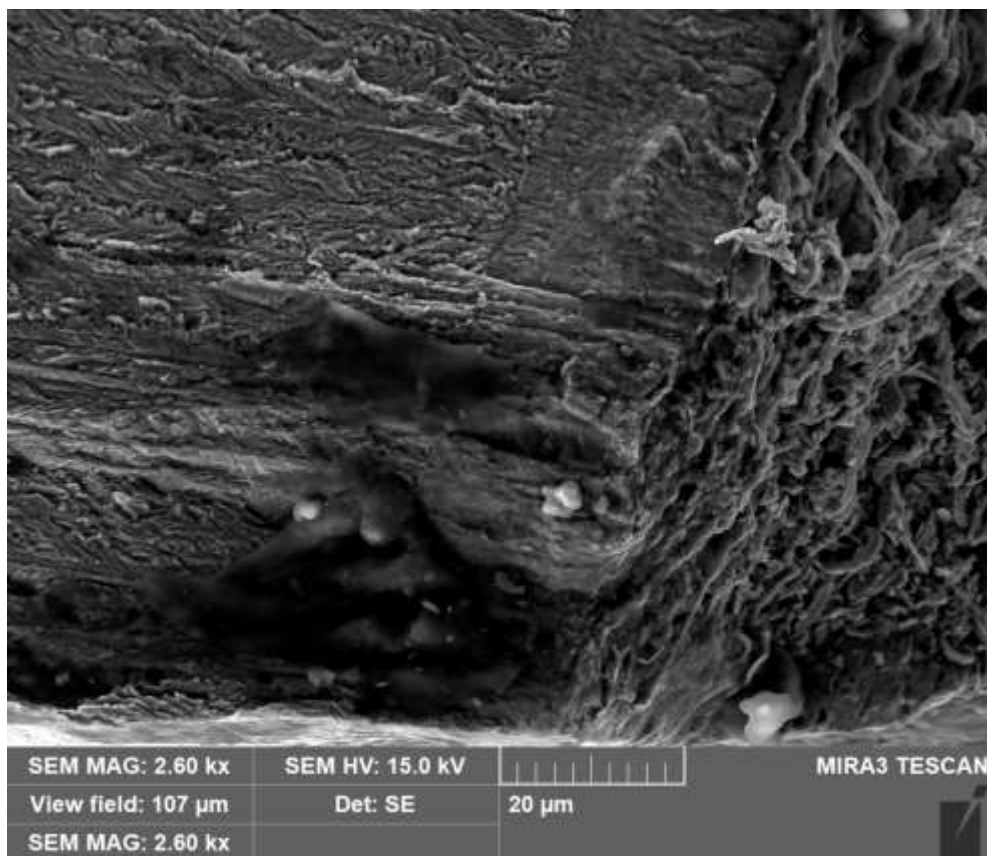
Obr. 12.7-3 Lomová plocha s vrubem



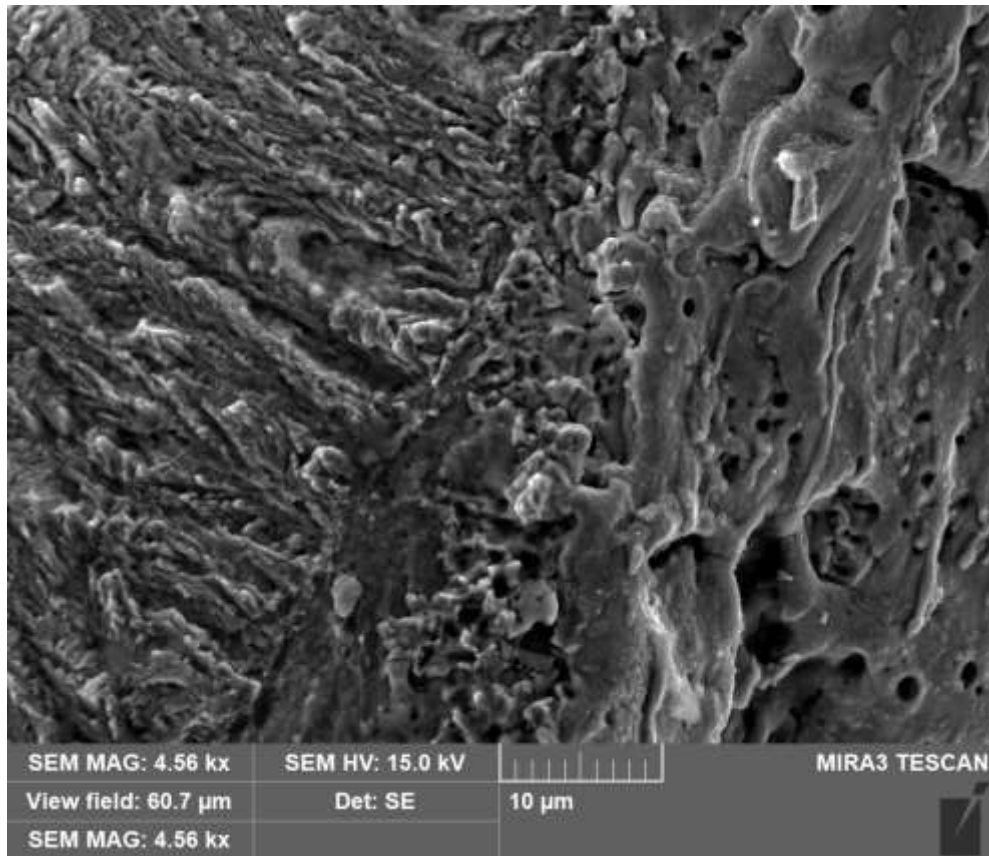
Obr. 12.7-4 Lomová plocha ZT



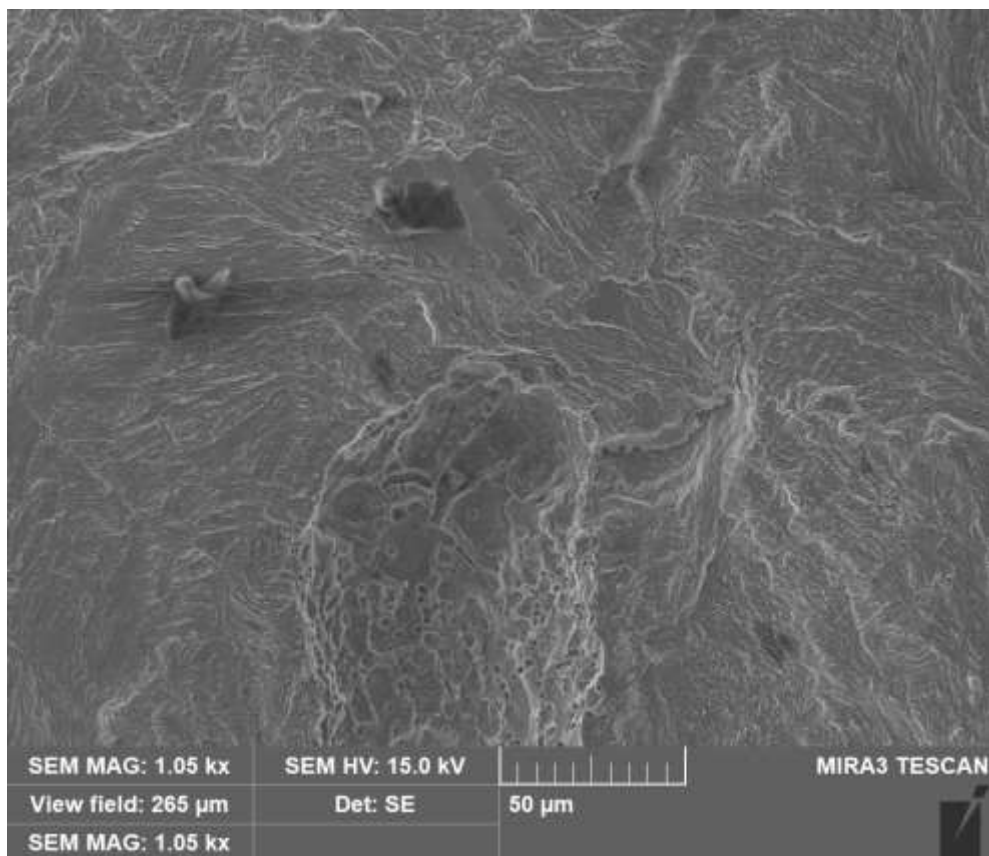
Obr. 12.7-5 Vrub



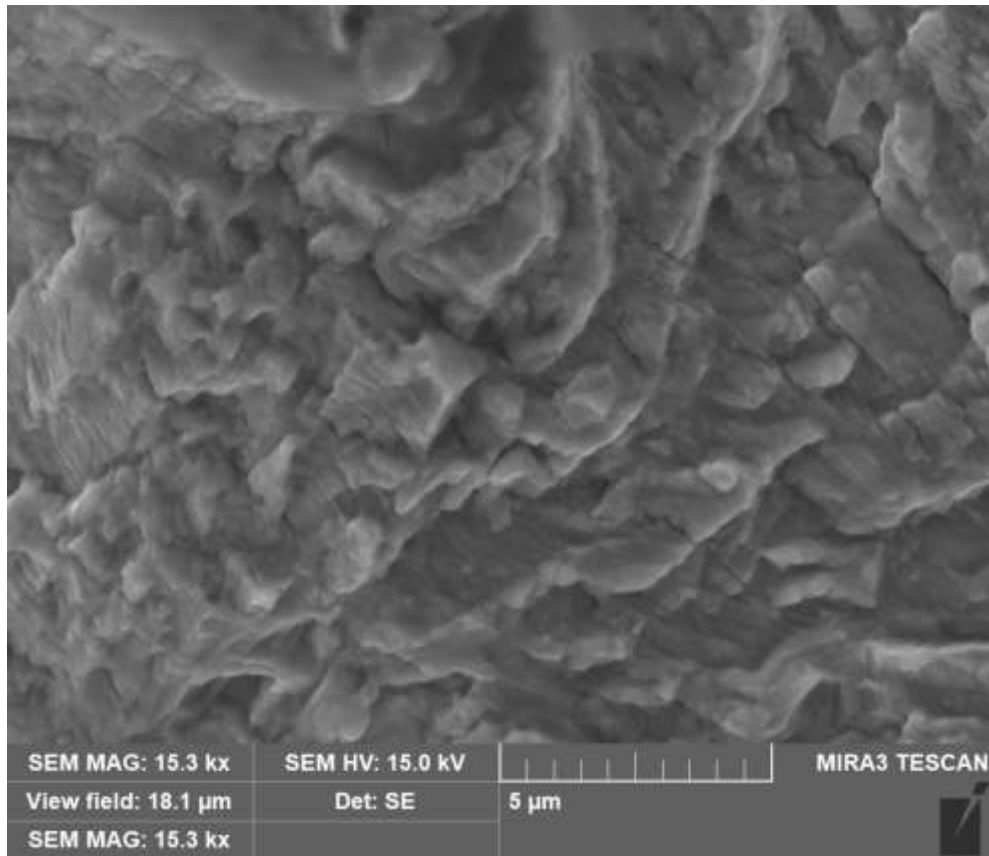
Obr. 12.7-6 hrana vrubu



Obr. 12.7-7bok vrubu

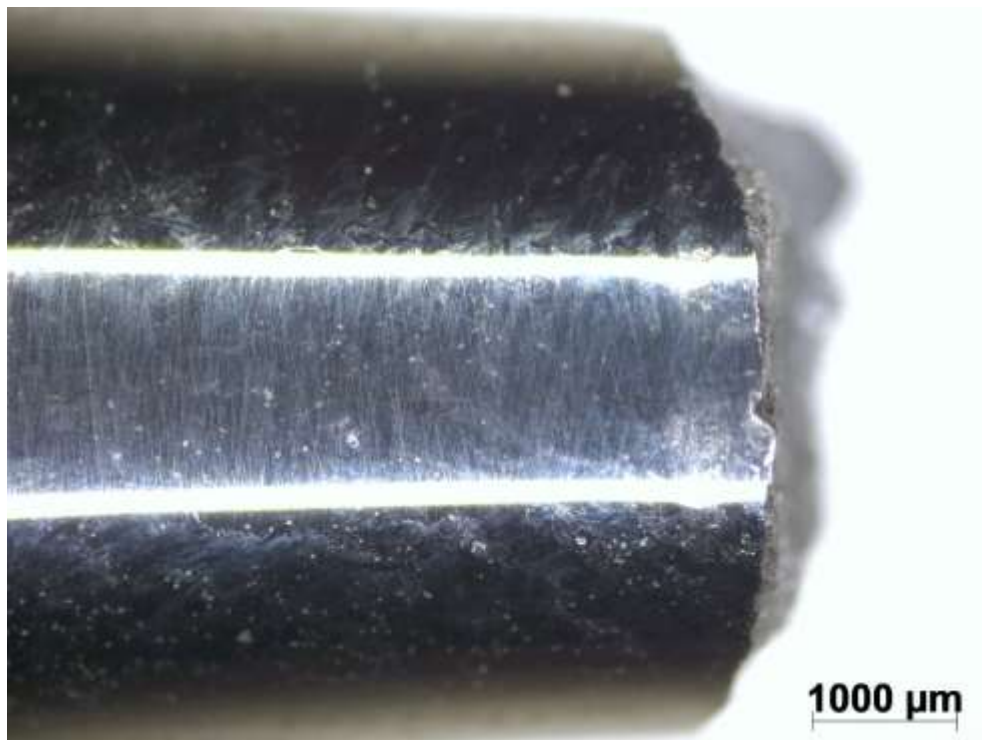


Obr. 12.7-8 kořen vrubu



Obr. 12.7-9 striační linie 0,8 mm od ohniska

12.8 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 25



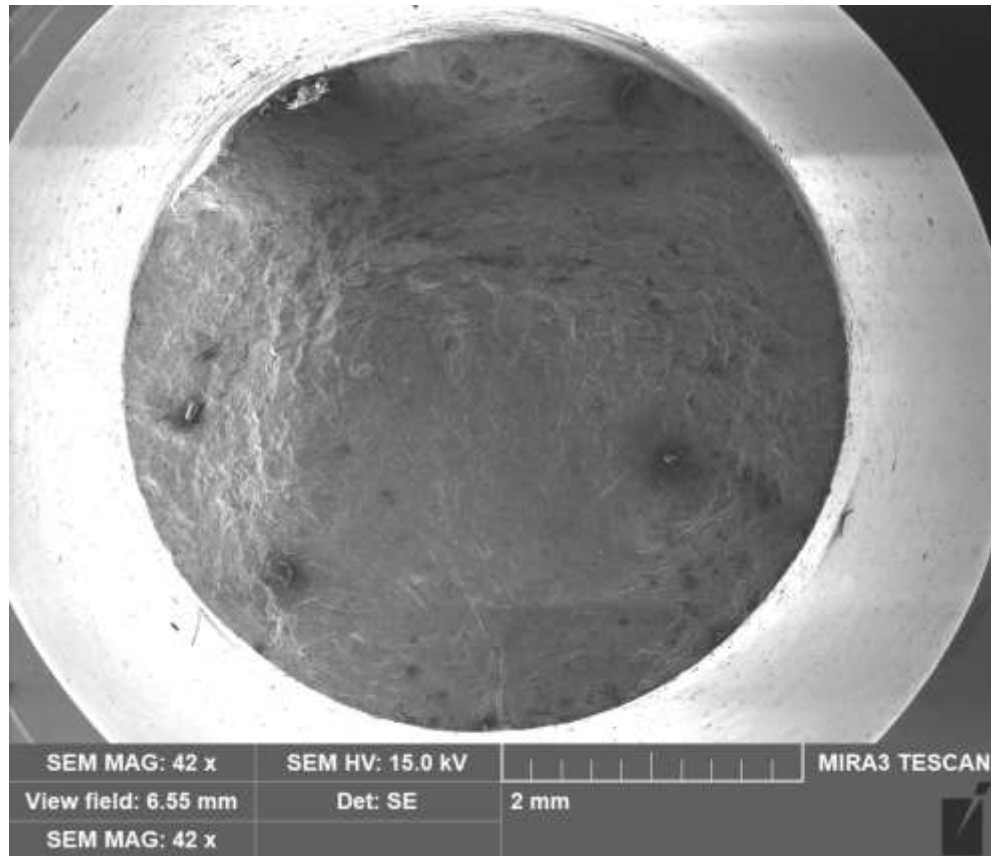
Obr. 12.8-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



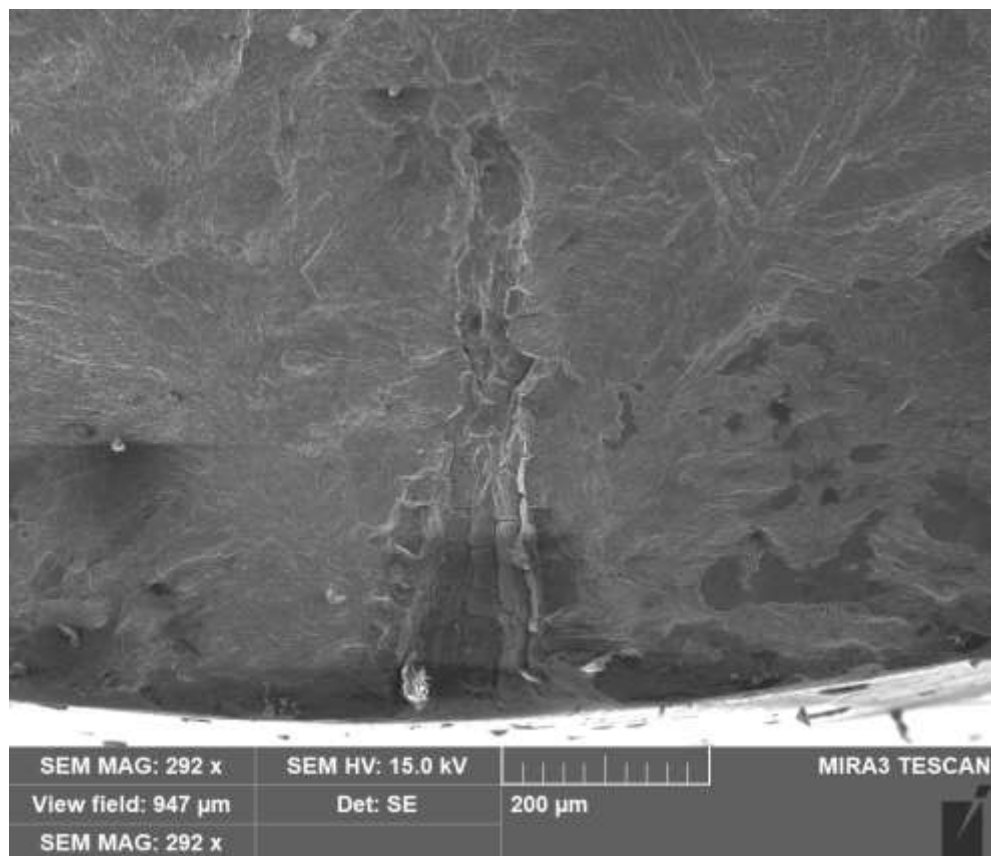
Obr. 12.8-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



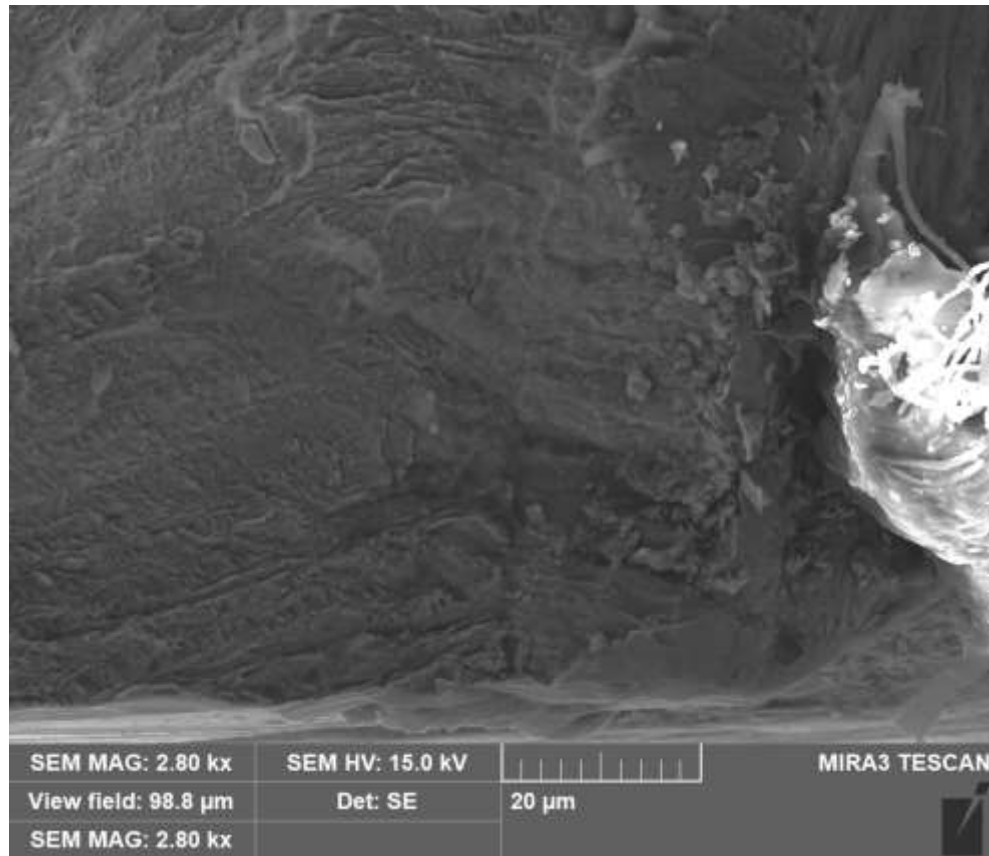
Obr. 12.8-3 Lomová plocha s vrubem



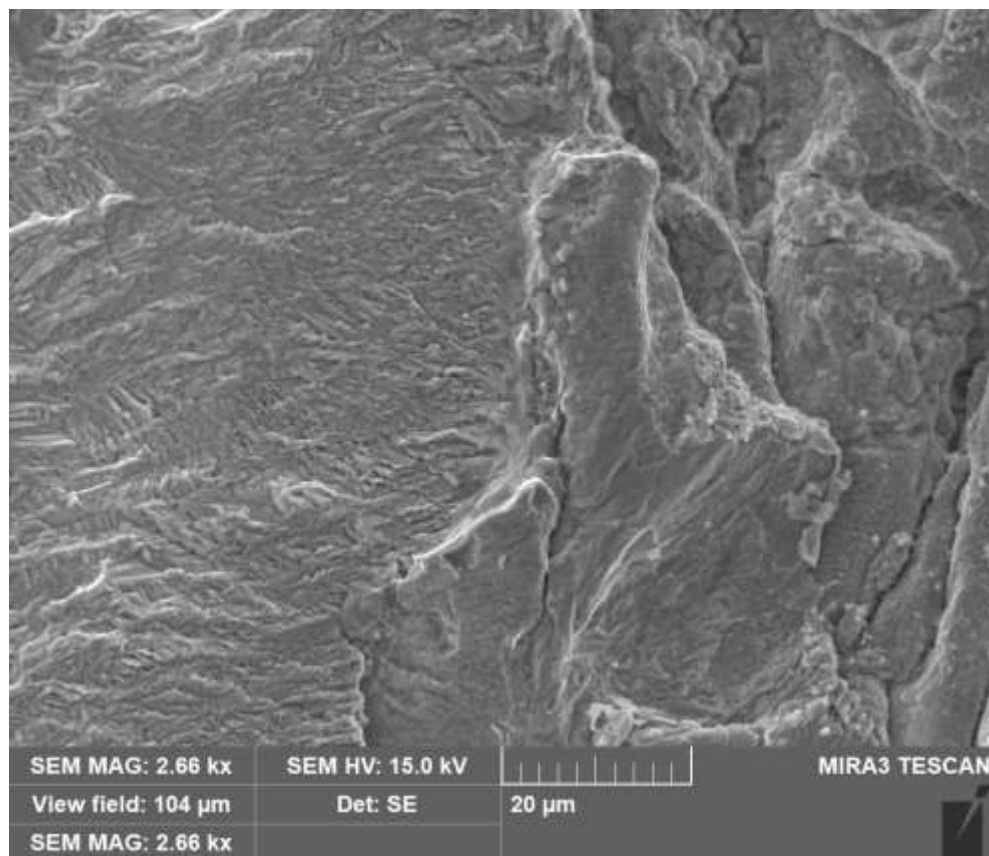
Obr. 12.8-4 Lomová plocha ZT



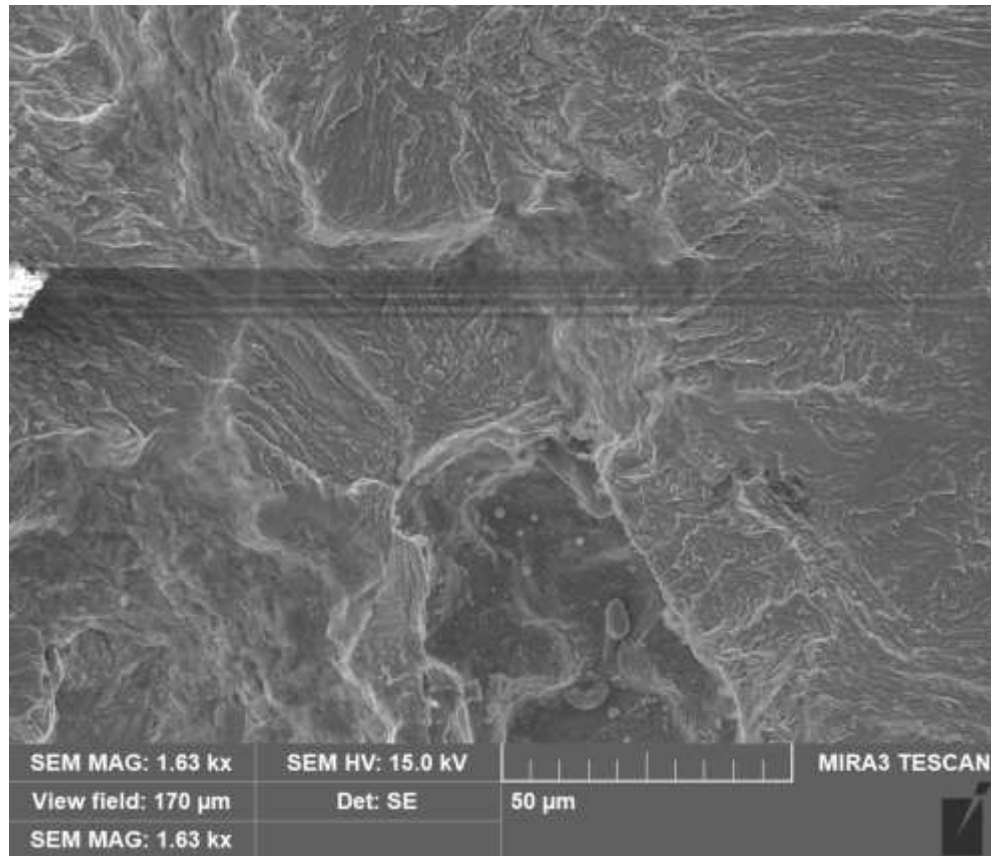
Obr. 12.8-5 Vrub



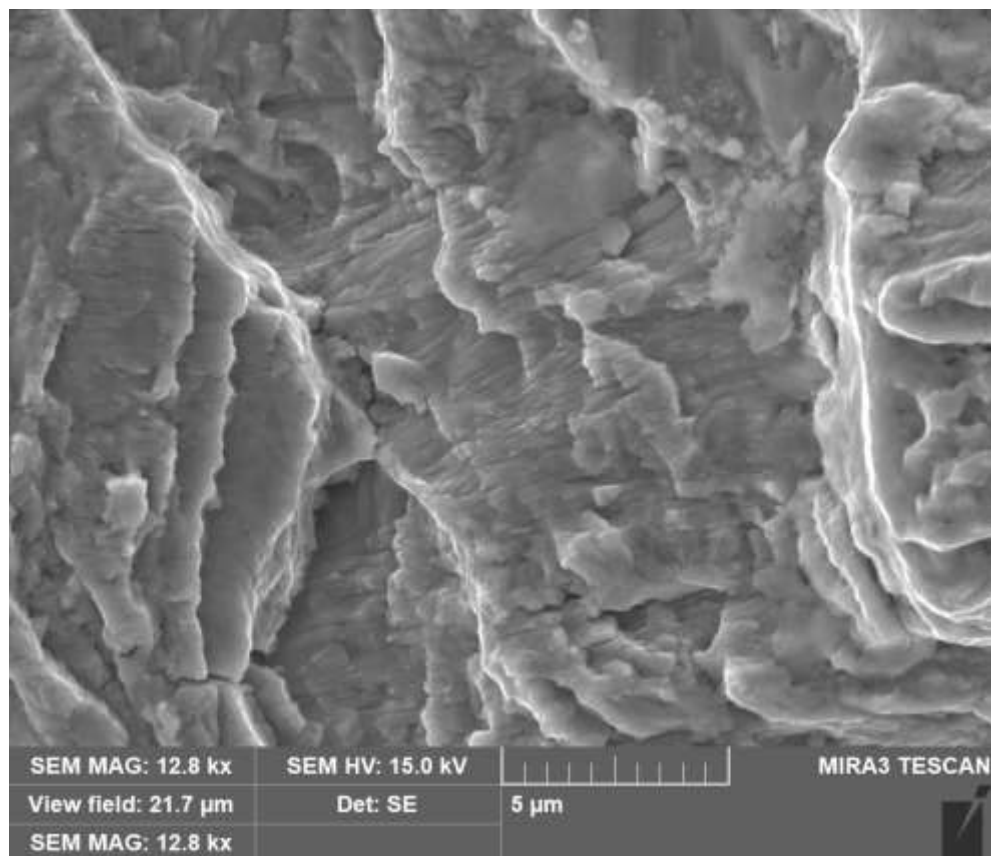
Obr. 12.8-6 Hrana vrubu



Obr. 12.8-7 Bok vrubu

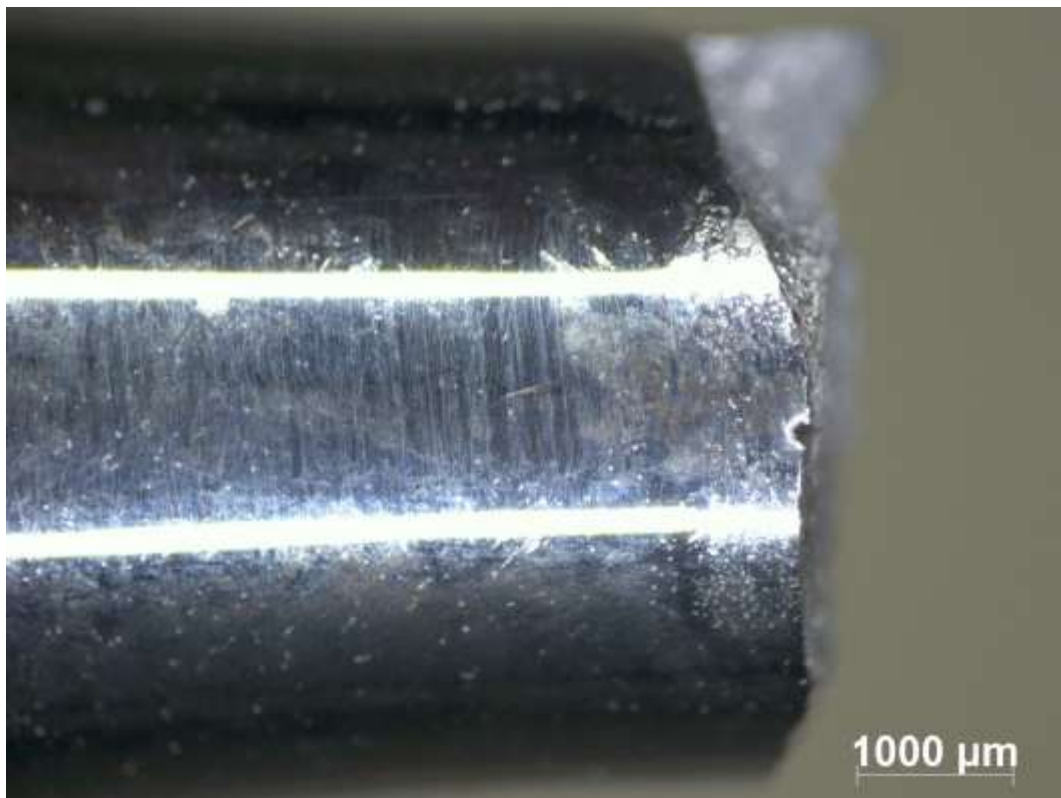


Obr. 12.8-8 Kořen vrubu

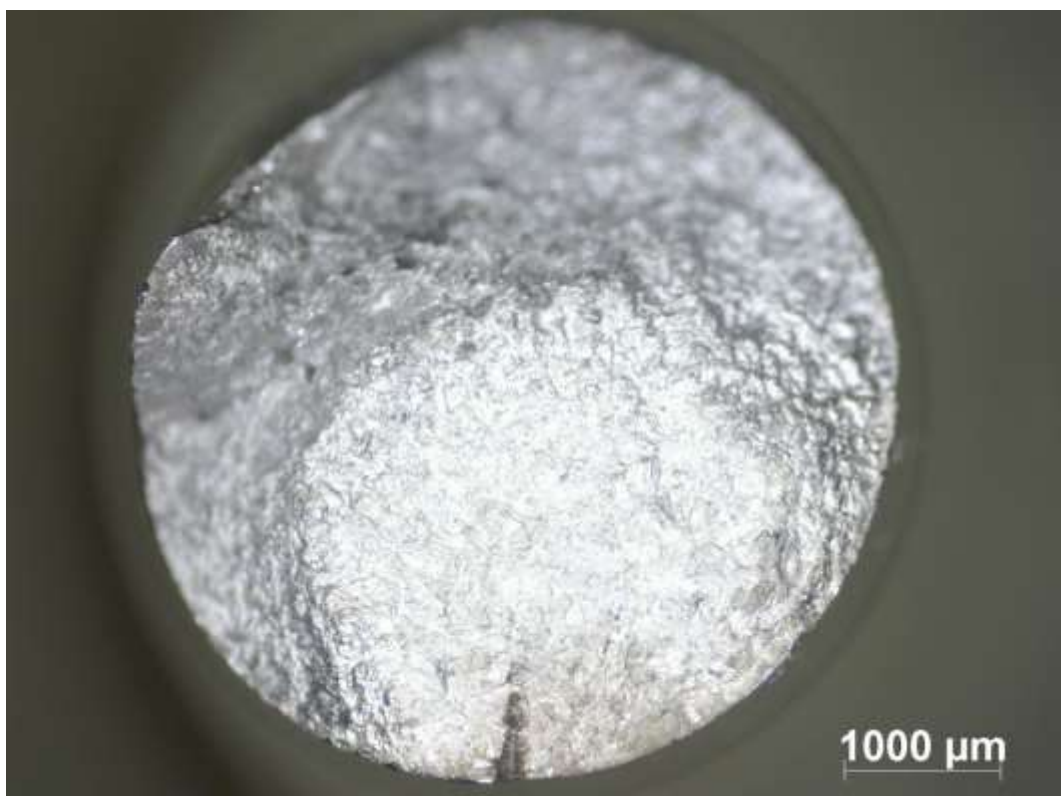


Obr. 12.8-9 Striační linie 0,84 mm od ohniska

12.9 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 42



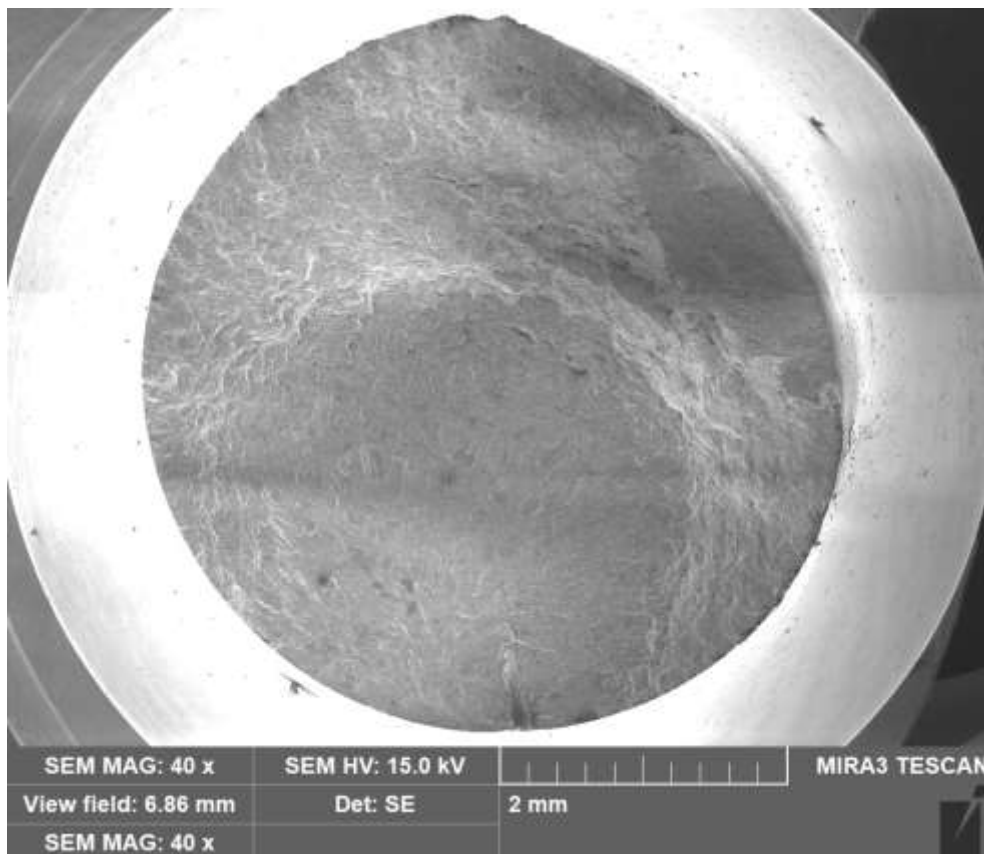
Obr. 12.9-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



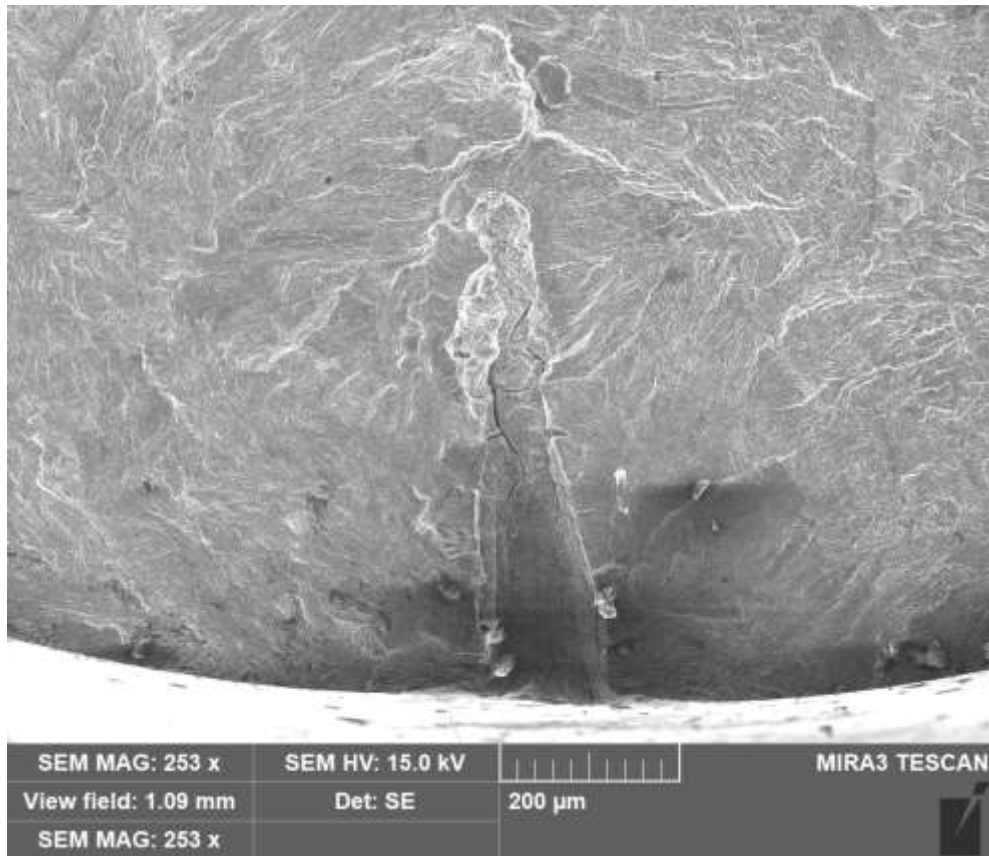
Obr. 12.9-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



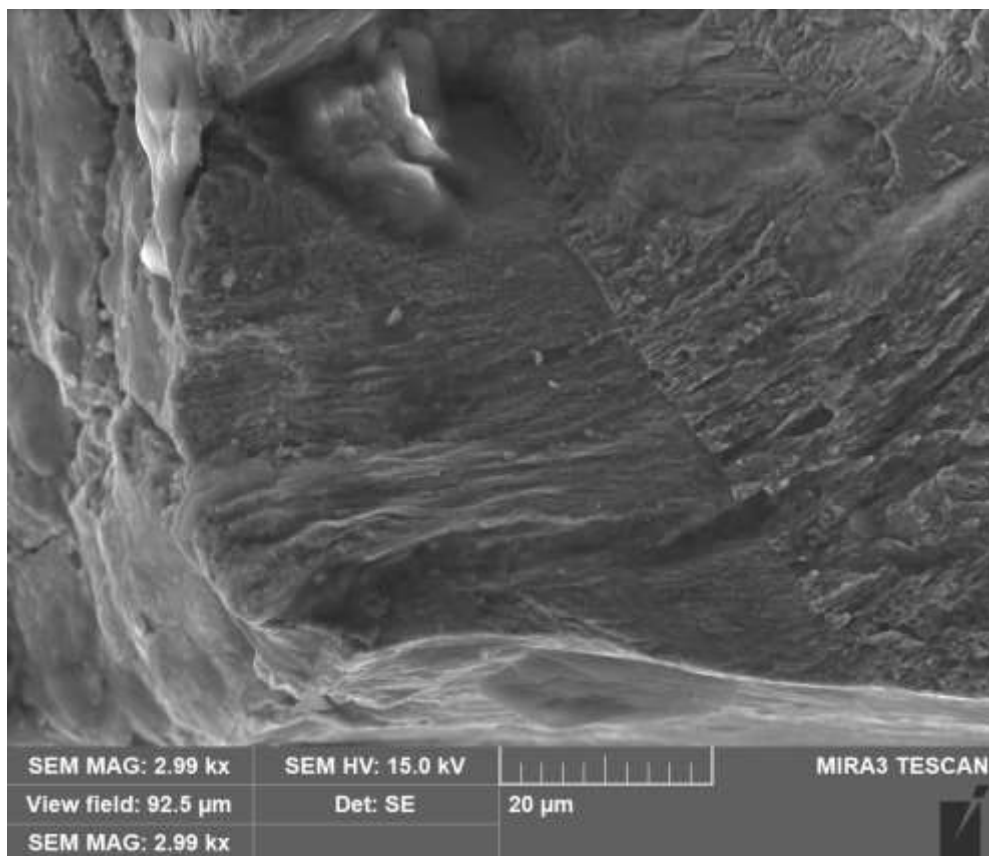
Obr. 12.9-3 Vrub



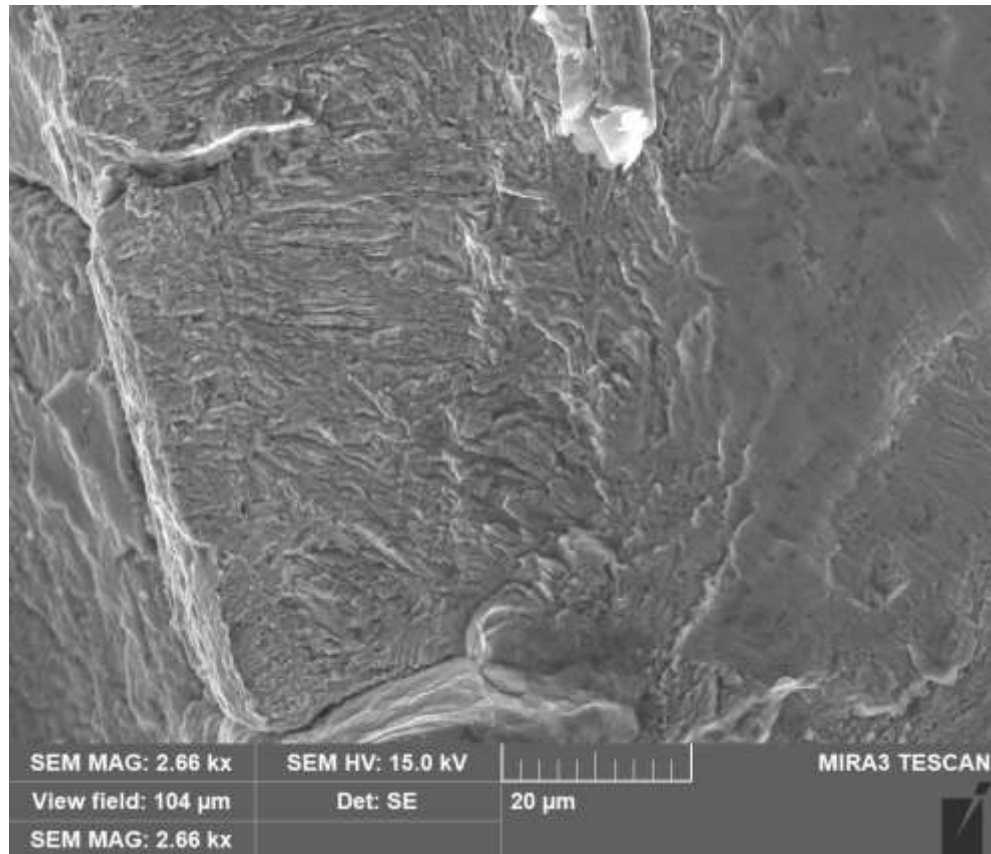
Obr. 12.9-4 Lomová plocha ZT



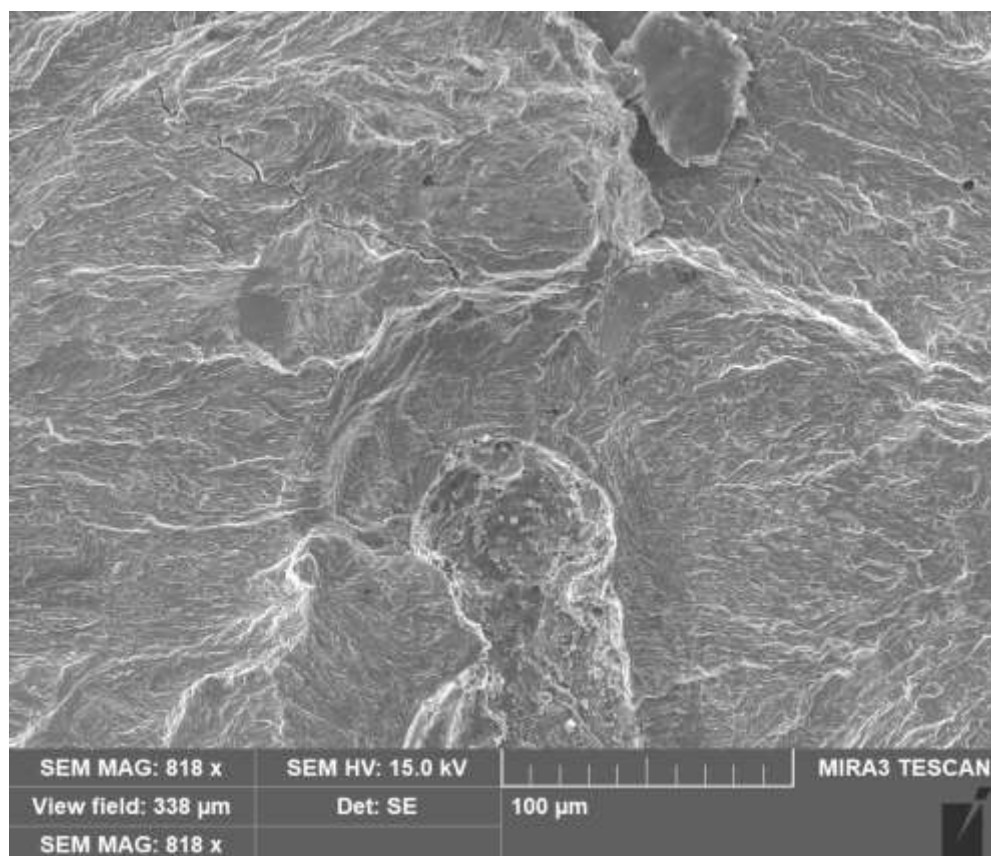
Obr. 12.9-5 Vrub



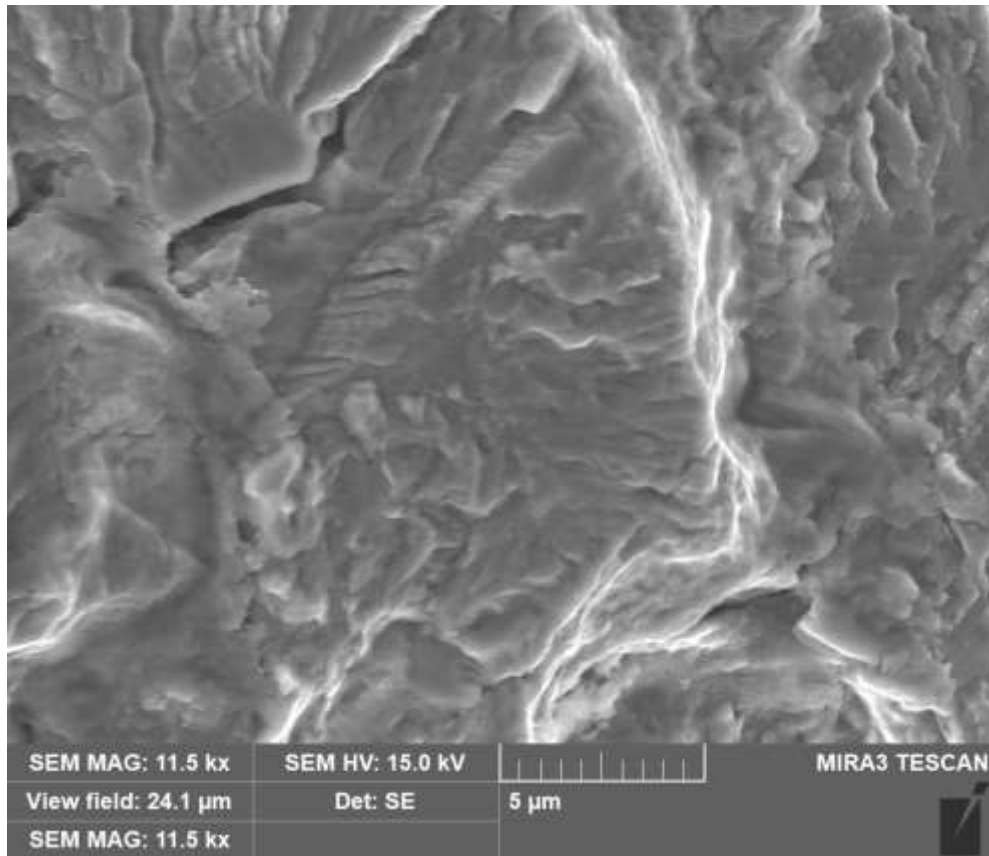
Obr. 12.9-6 Hrana vrubu



Obr. 12.9-7 Bok vrubu

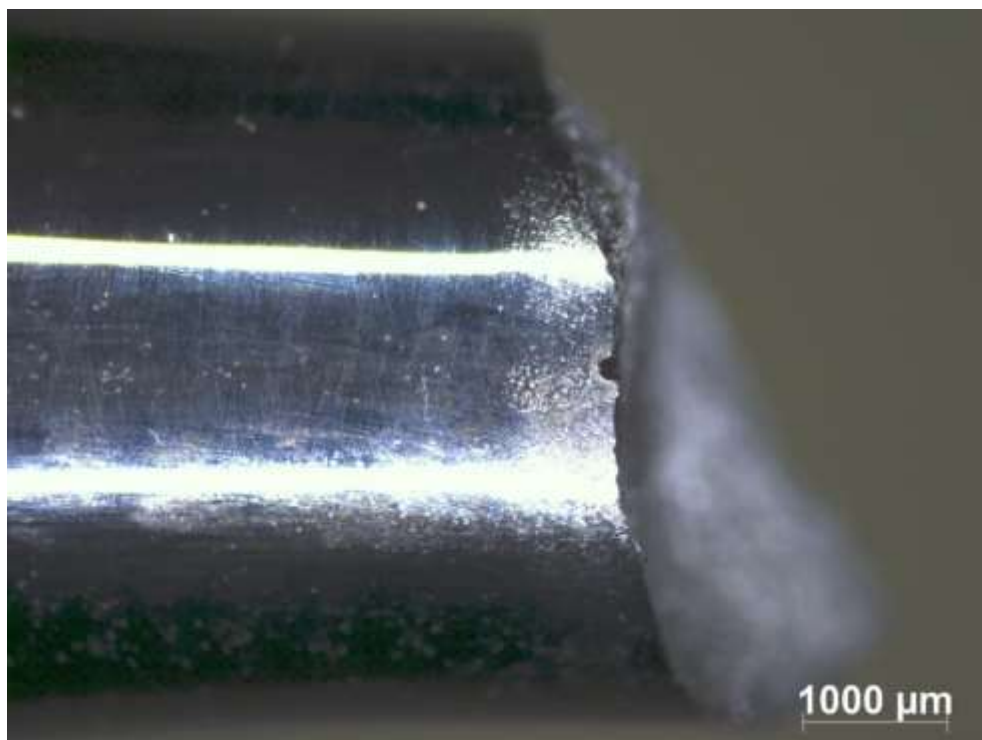


Obr. 12.9-8 Kořen vrubu

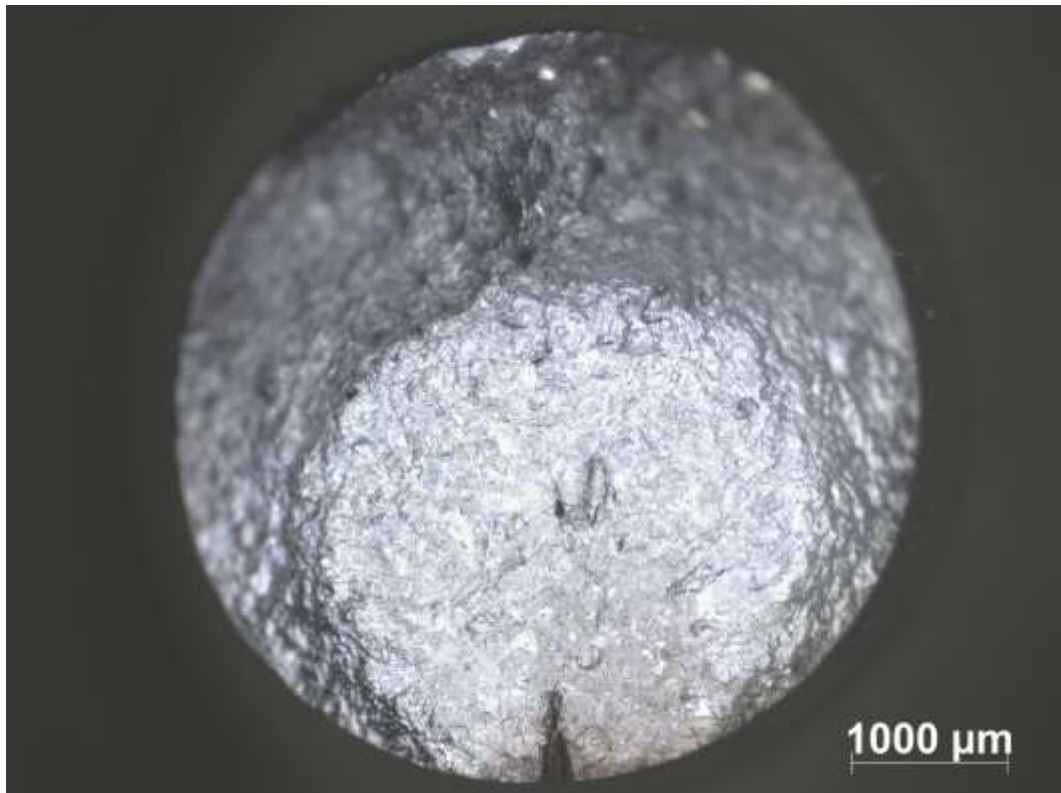


Obr. 12.9-9 Striační linie 0,7 mm od ohniska

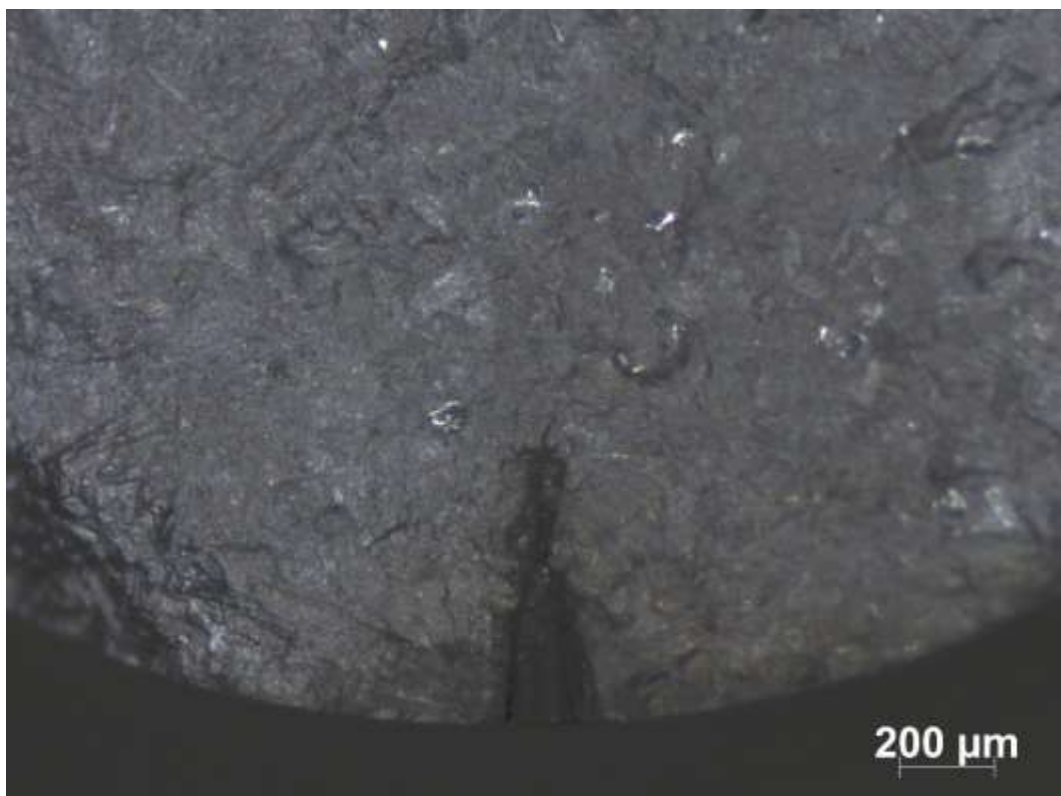
12.10 Fraktografická analýza zkušebního tělesa 42



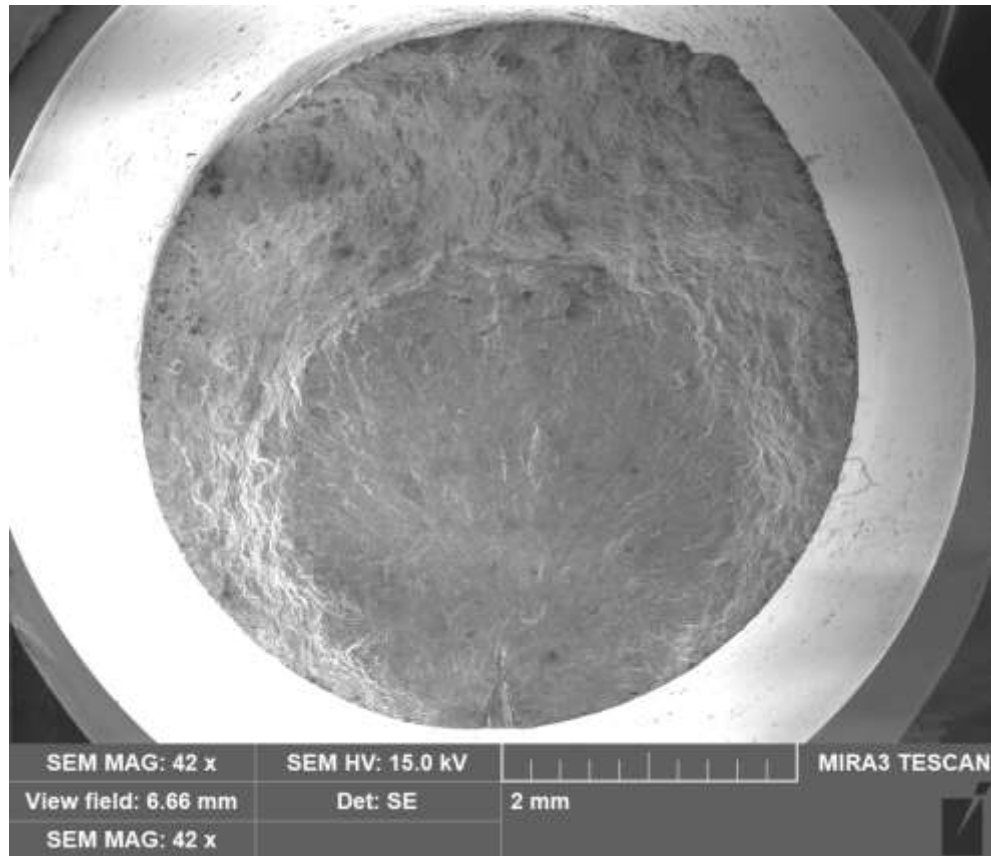
Obr. 12.10-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



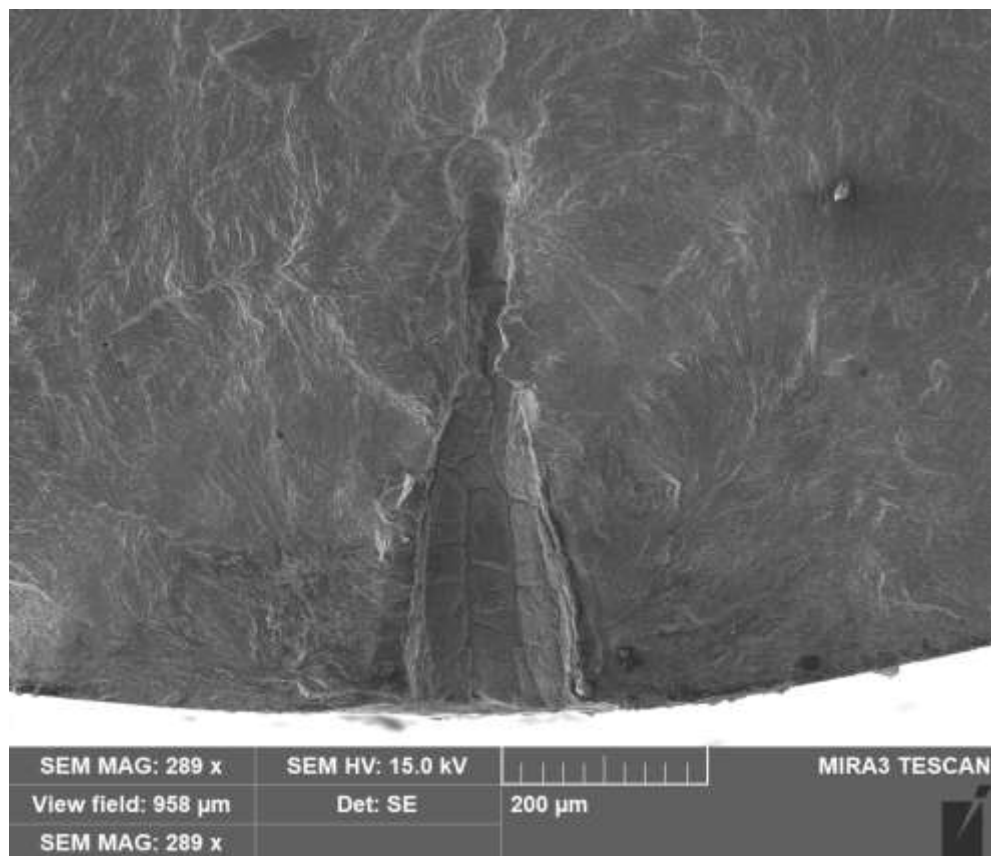
Obr. 12.10-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



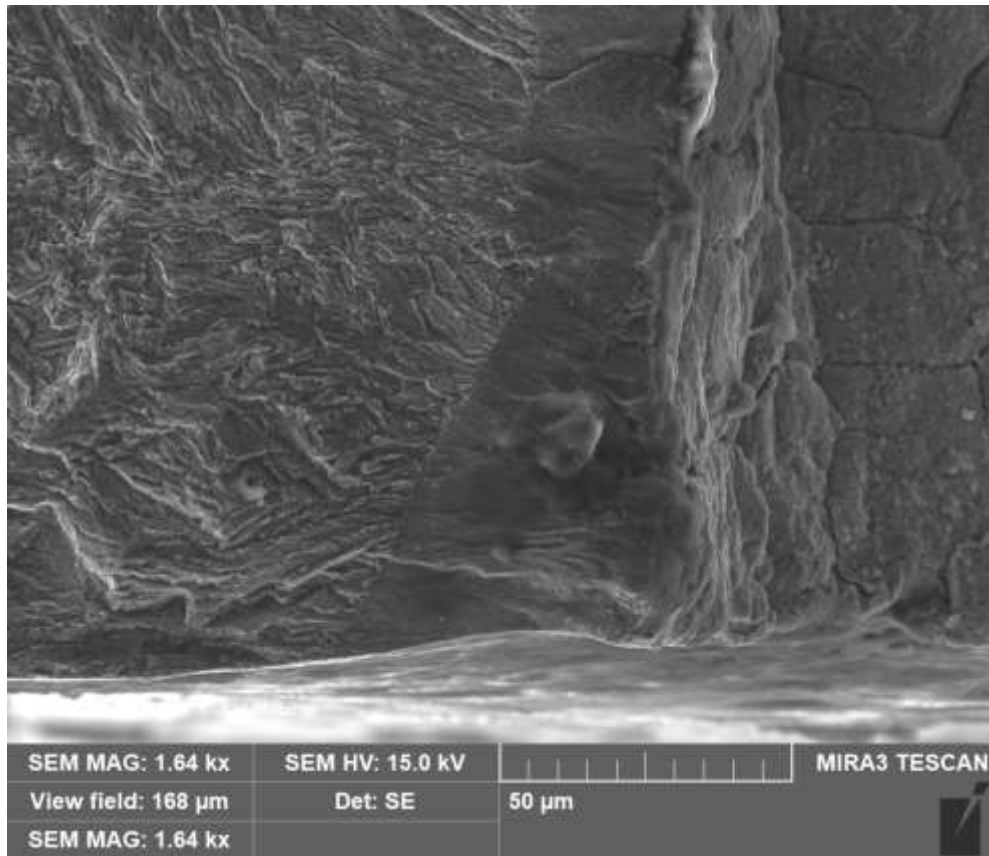
Obr. 12.10-3 Lomová plocha s vrubem



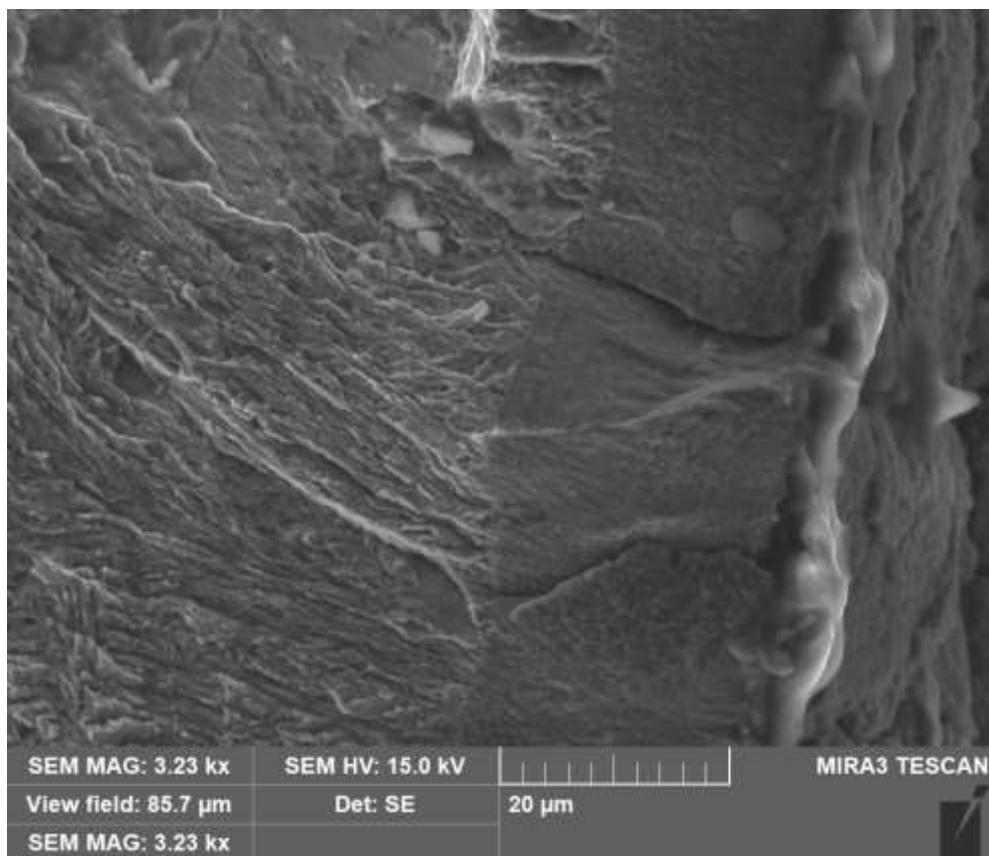
Obr. 12.10-4 Lomová plocha ZT



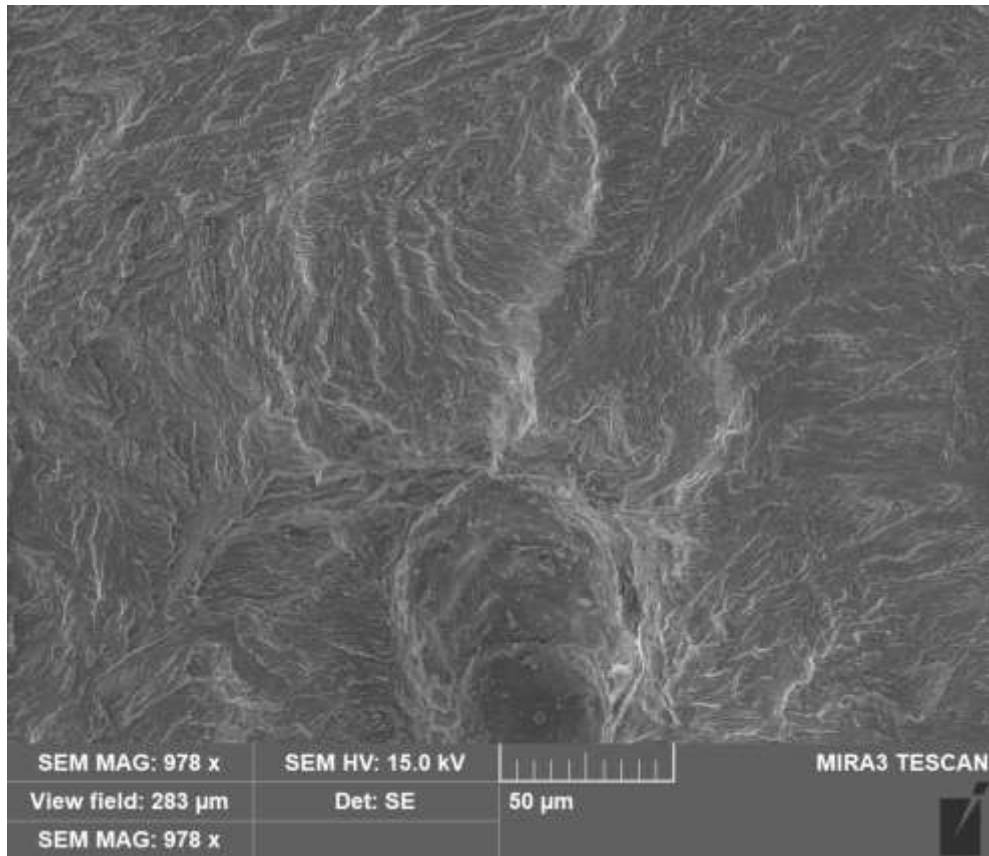
Obr. 12.10-5 Vrub



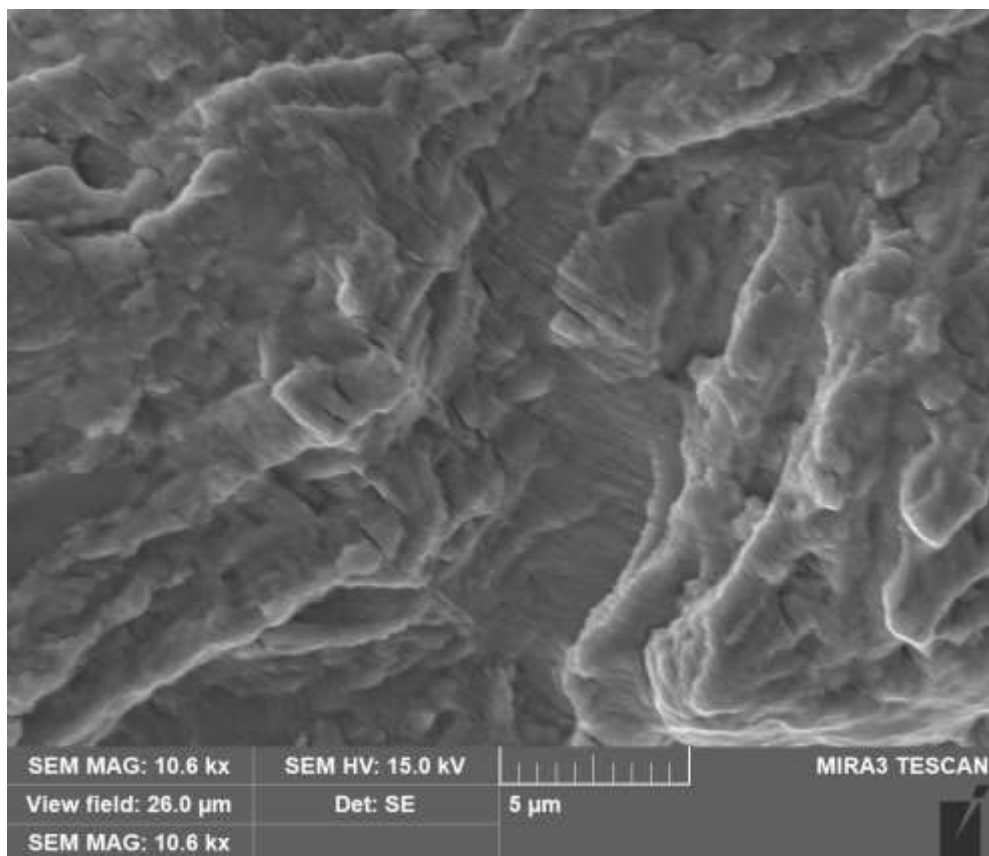
Obr. 12.10-6 Hrana vrubu



Obr. 12.10-7 Bok vrubu

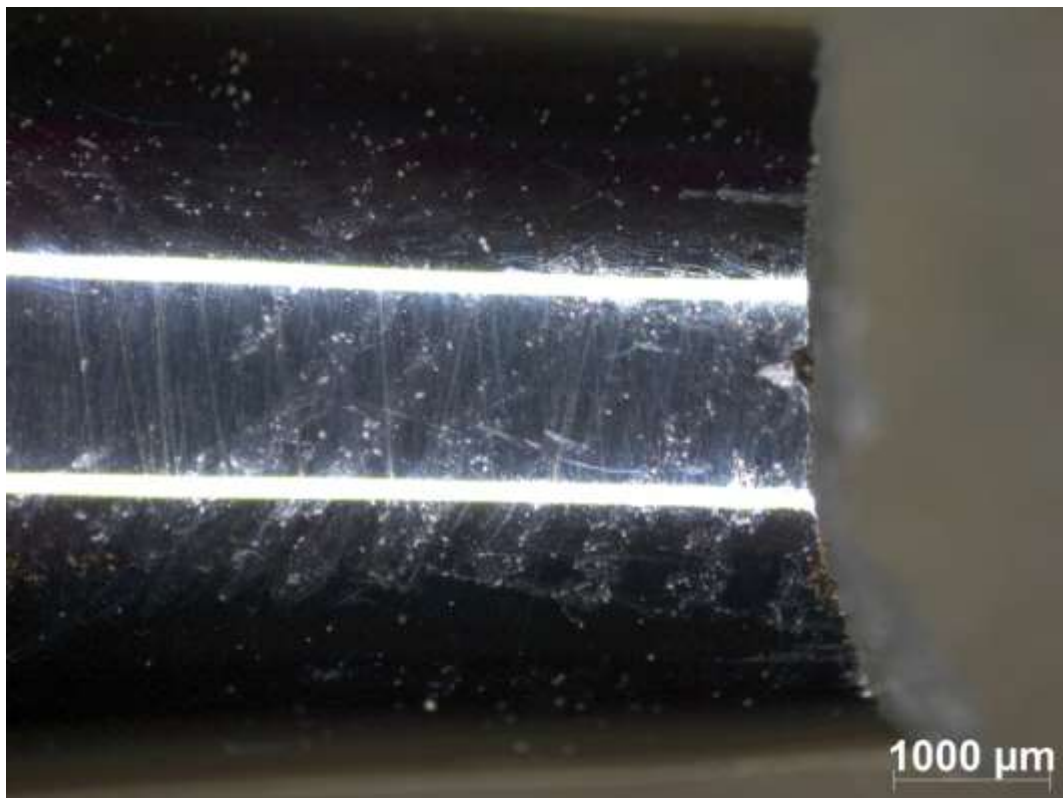


Obr. 12.10-8 Kořen vrubu

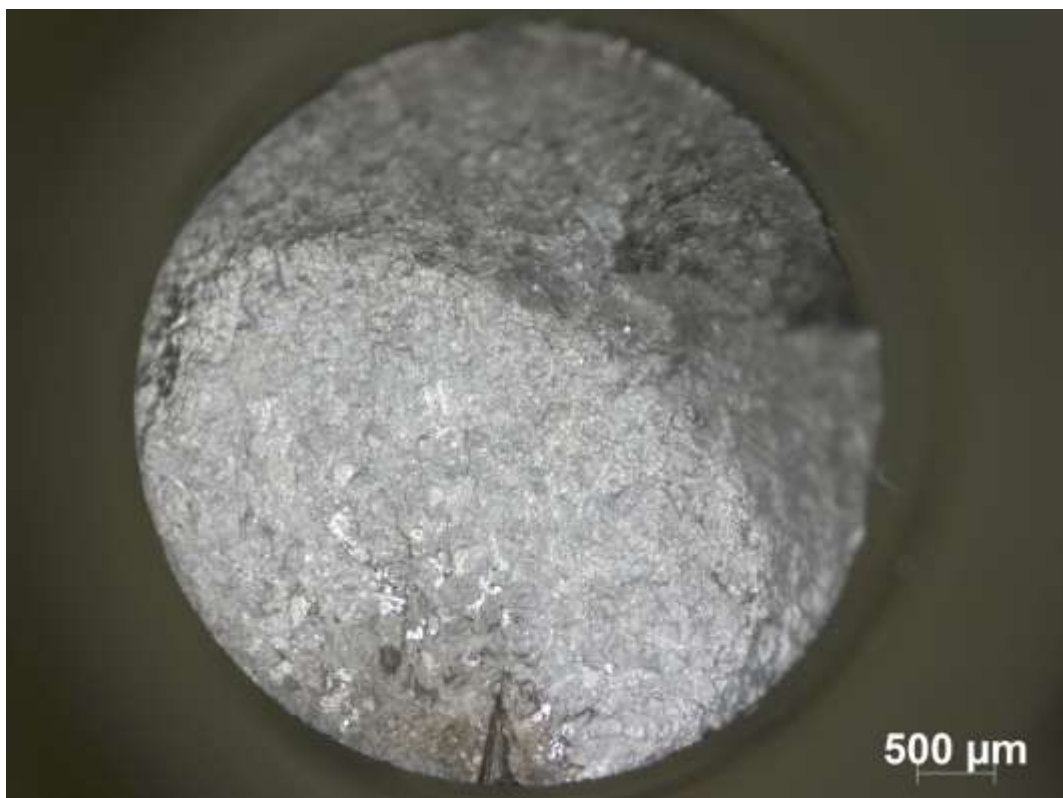


Obr. 12.10-9 Striační linie 0,95 od ohniska

12.11 Fraktografická analýza zkušebního tělesa B1



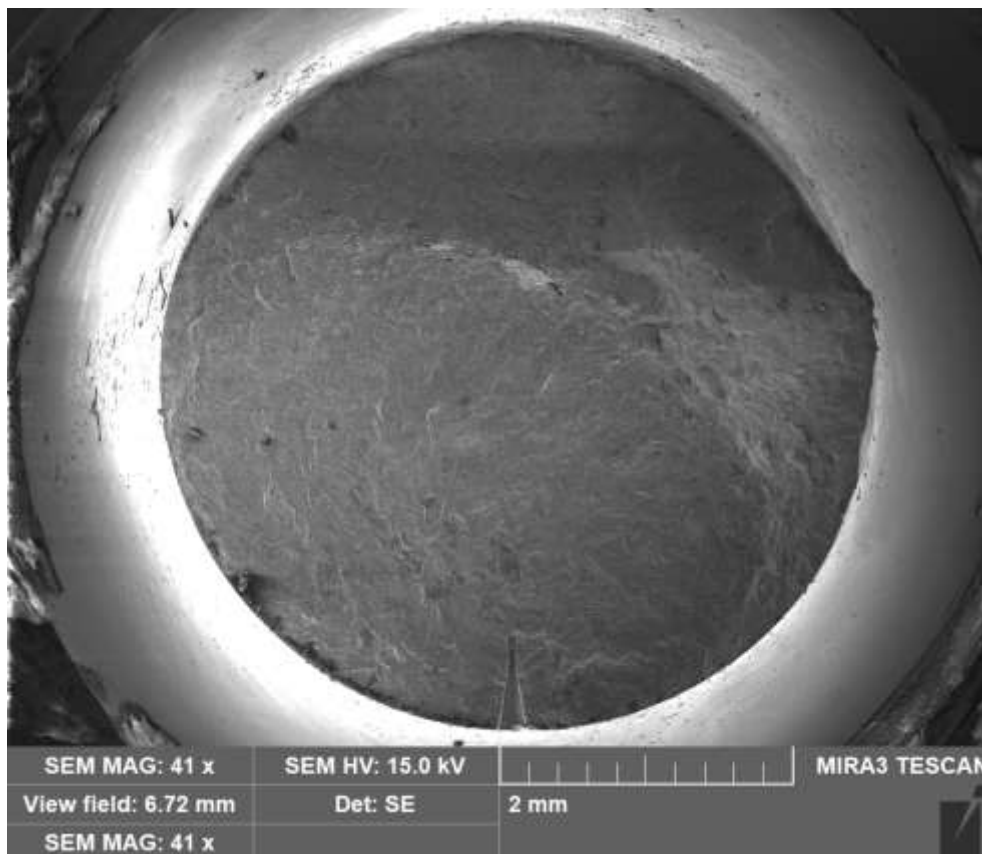
Obr. 12.11-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



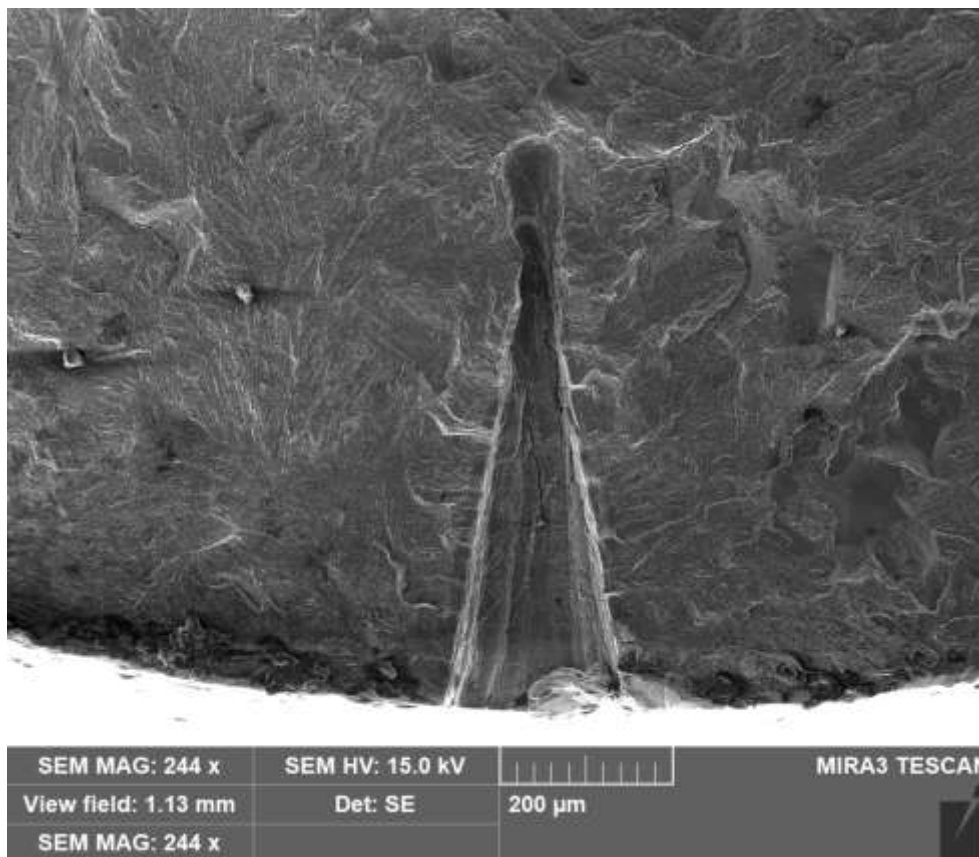
Obr. 12.11-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



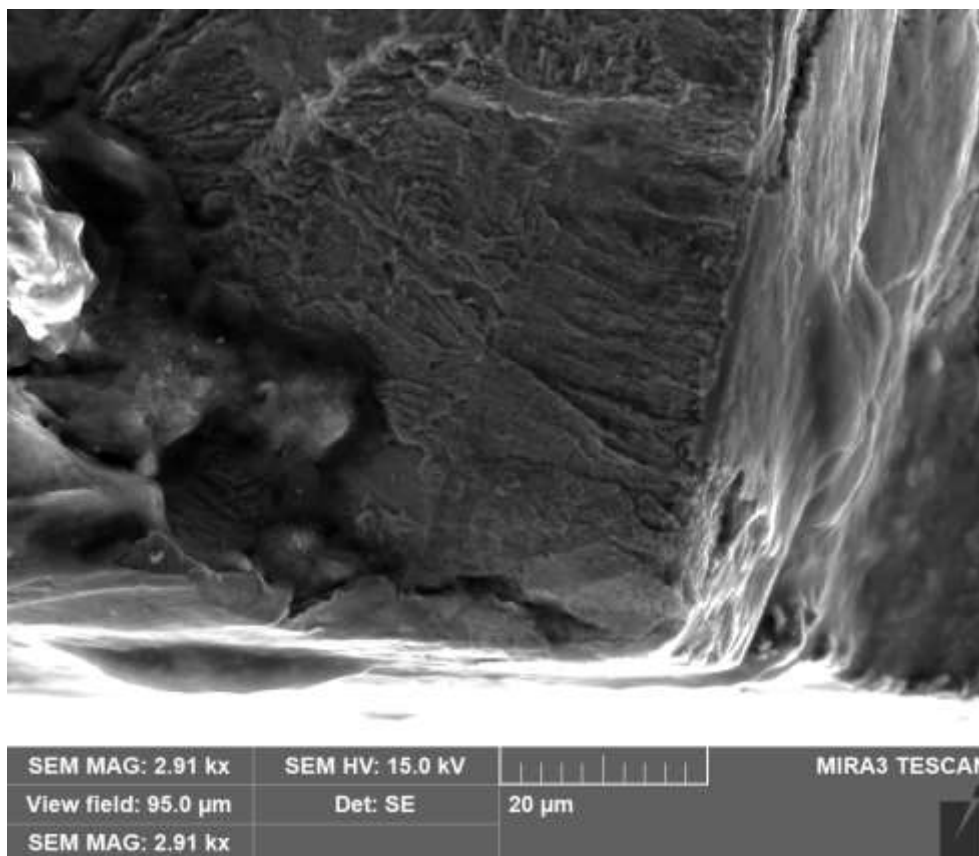
Obr. 12.11-3 Lomová plocha s vrubem



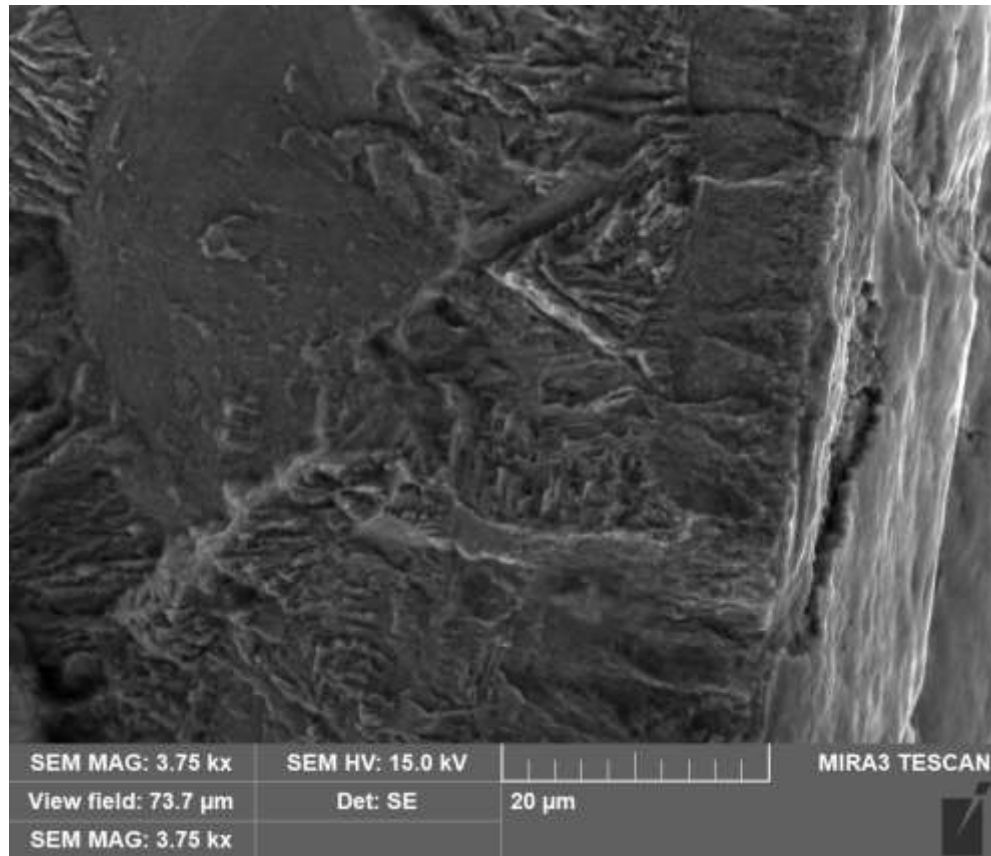
Obr. 12.11-4 Lomová plocha ZT



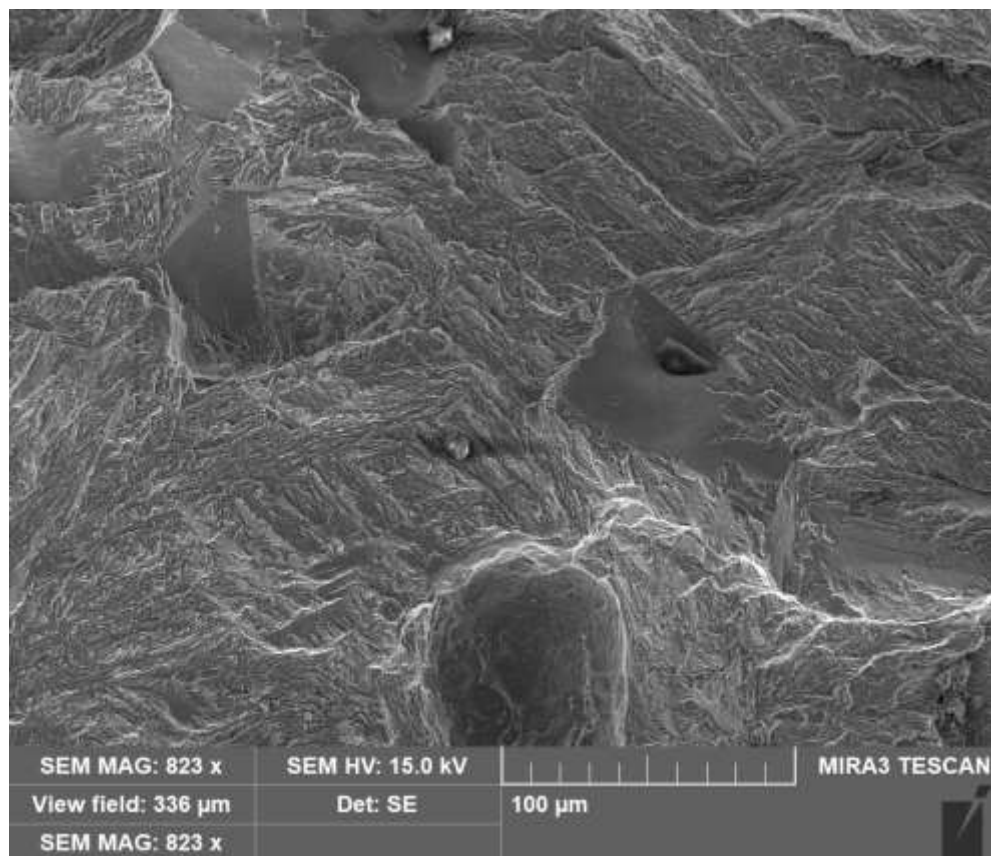
Obr. 12.11-5 Vrub



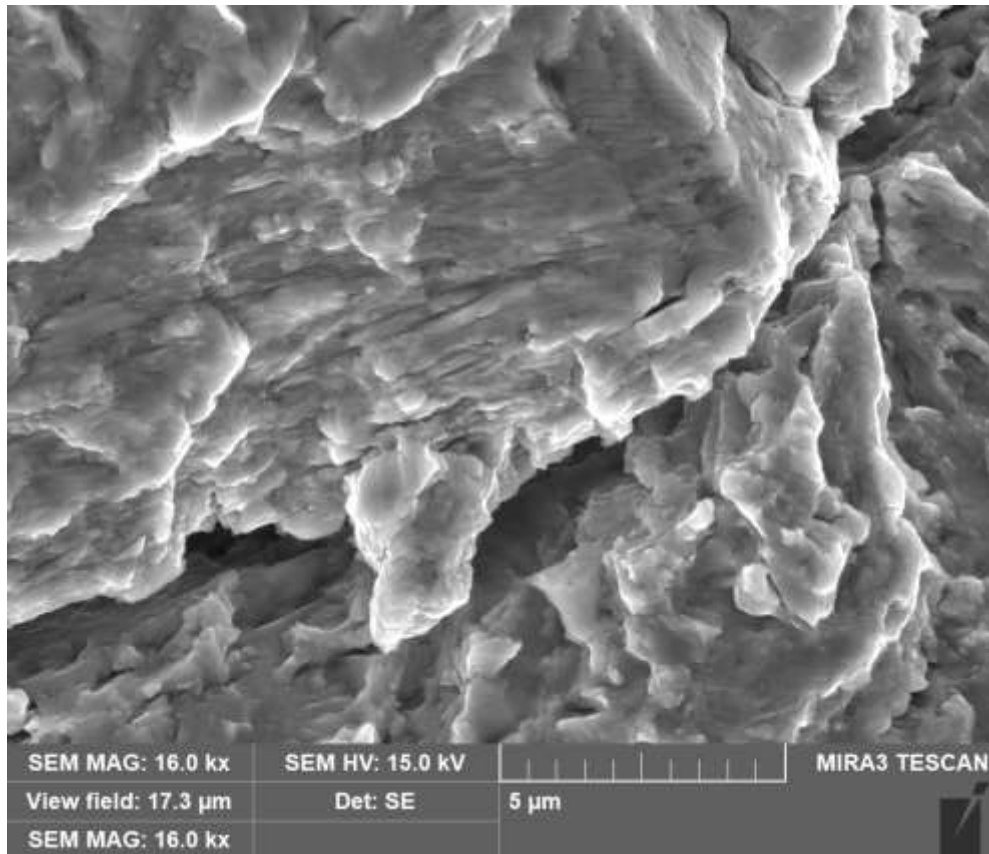
Obr. 12.11-6 Hrana vrubu



Obr. 12.11-7 Bok vrubu

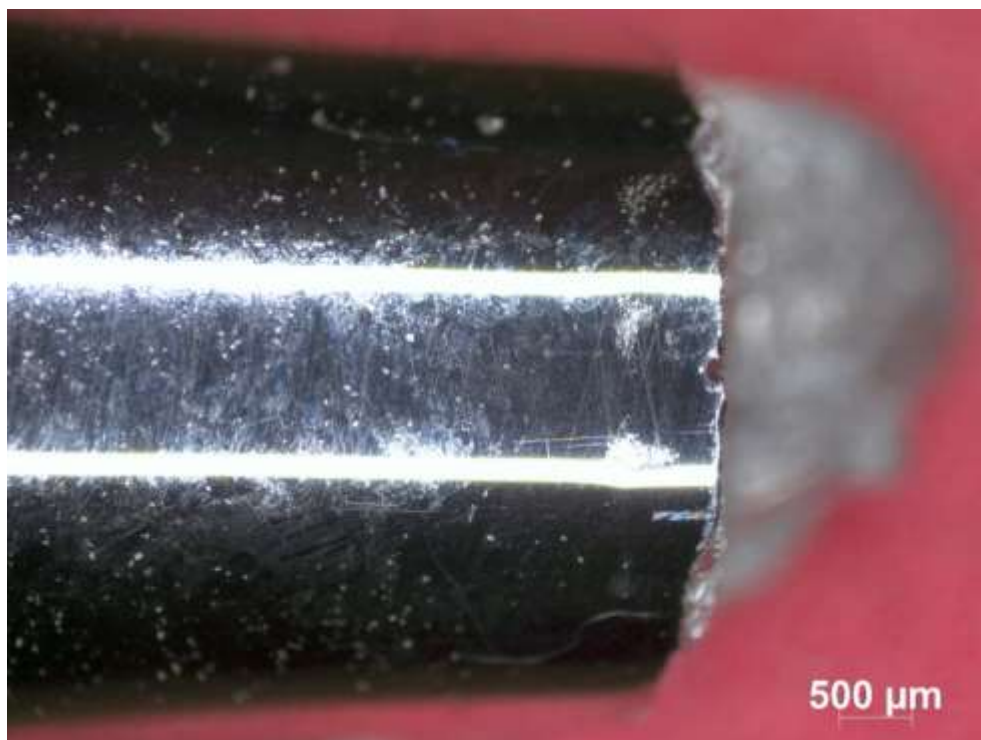


Obr. 12.11-8 Kořen vrubu



Obr. 12.11-9 Striační linie 2,2 mm od ohniska

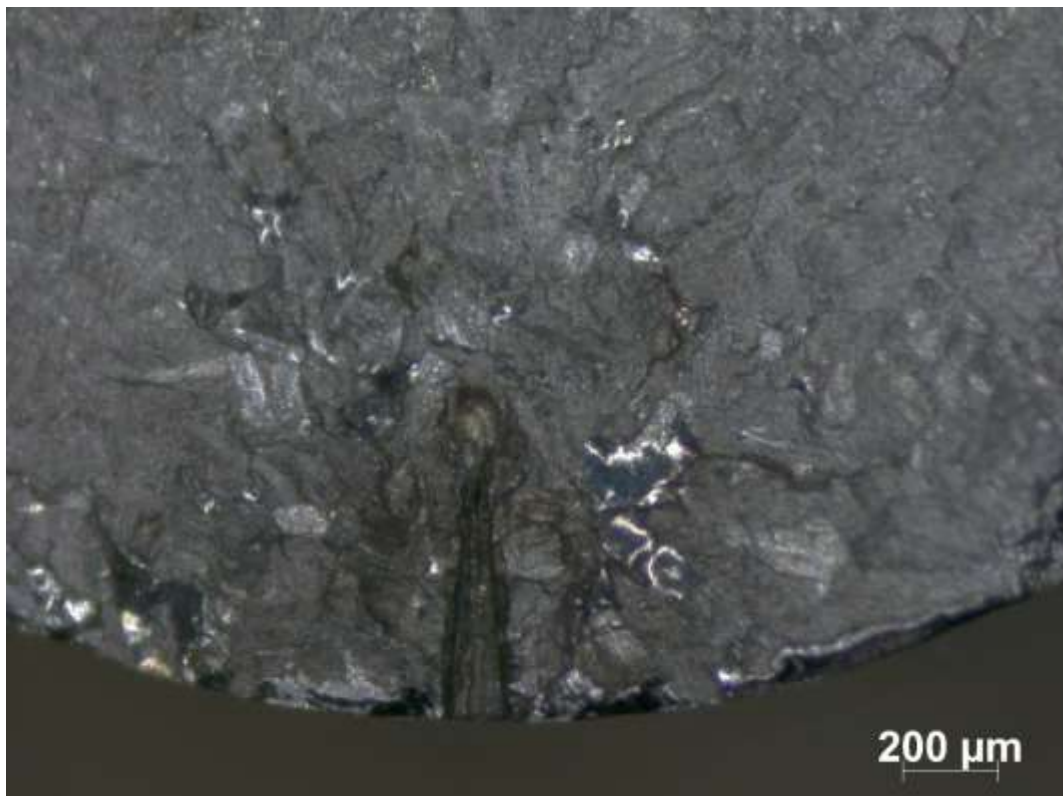
12.12 Fraktografická analýza zkušebního tělesa B7



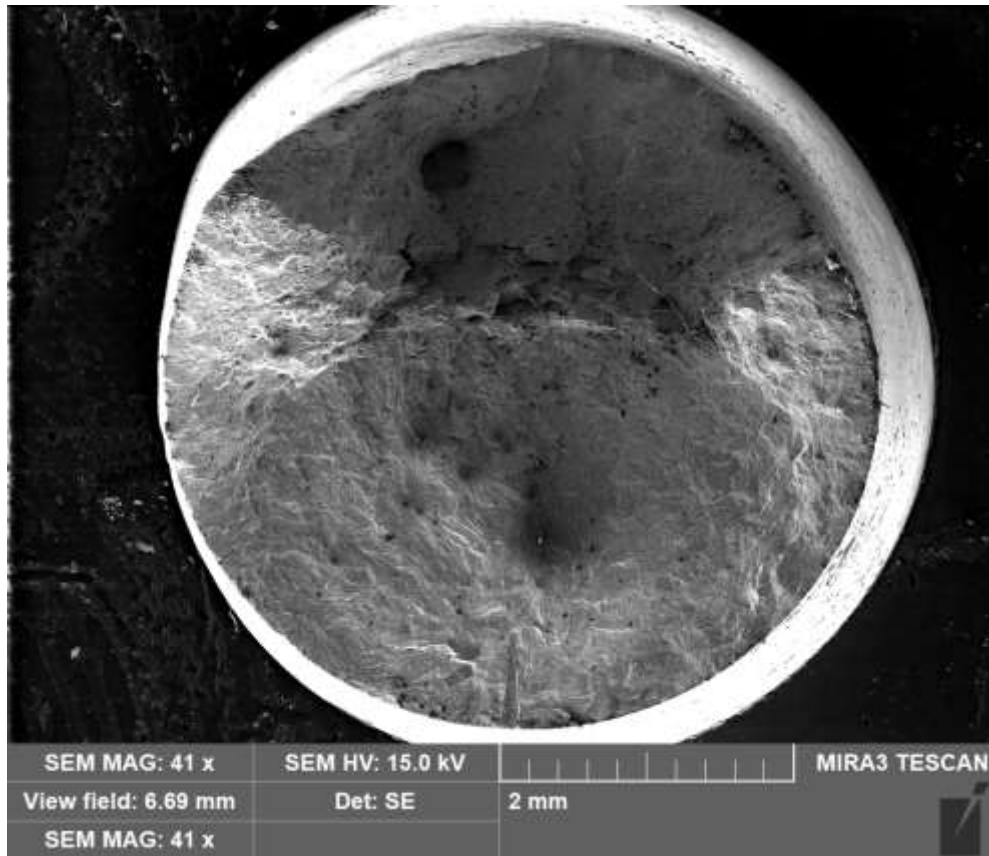
Obr. 12.12-1 Boční pohled vzhledem k poloze ohniska



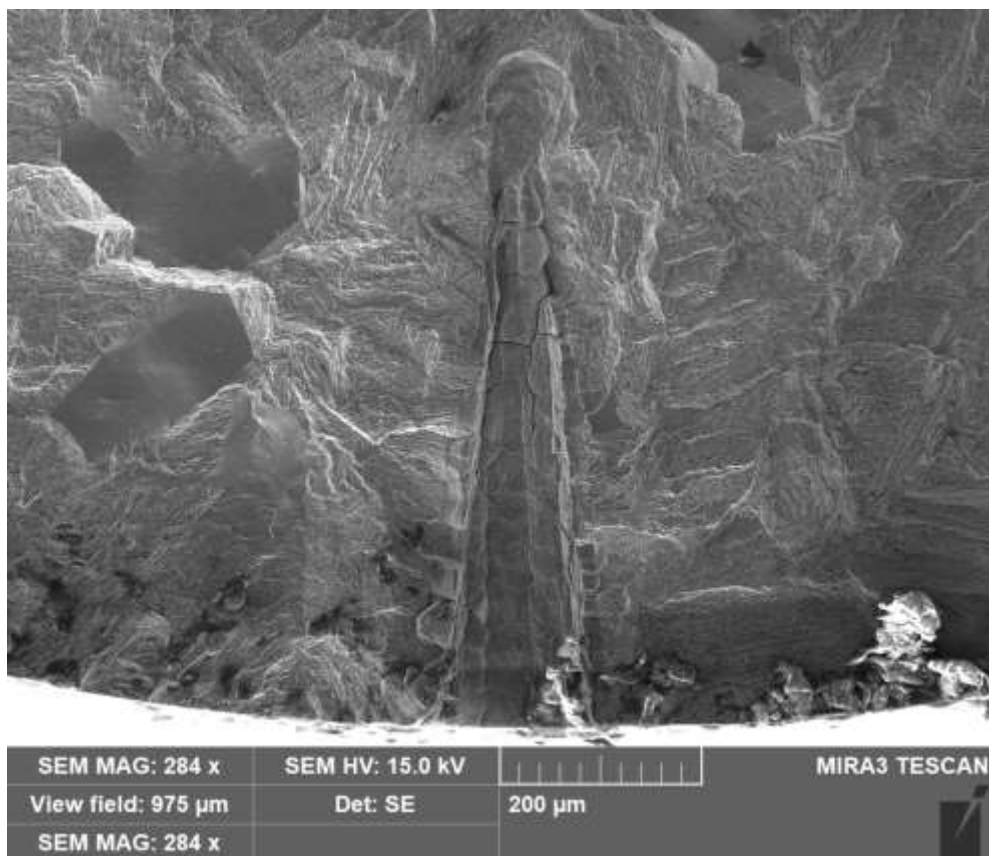
Obr. 12.12-2 Lomová plocha celého ZT v příčném směru



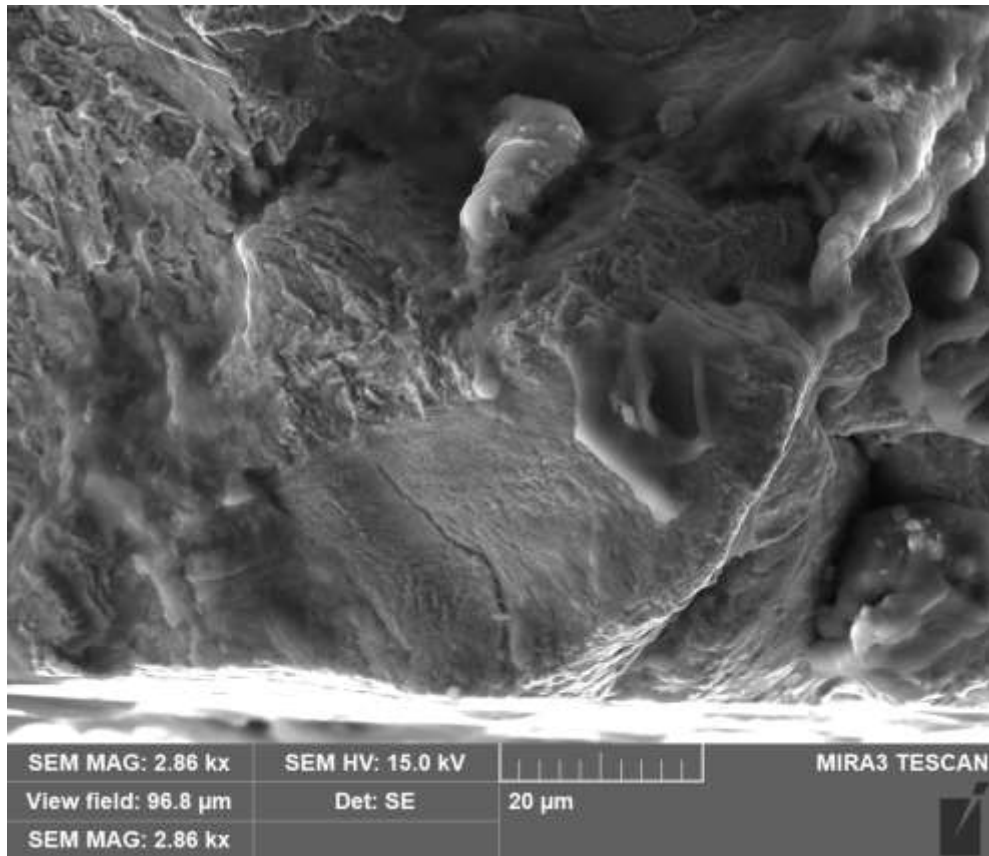
Obr. 12.12-3 Lomová plocha s vrubem



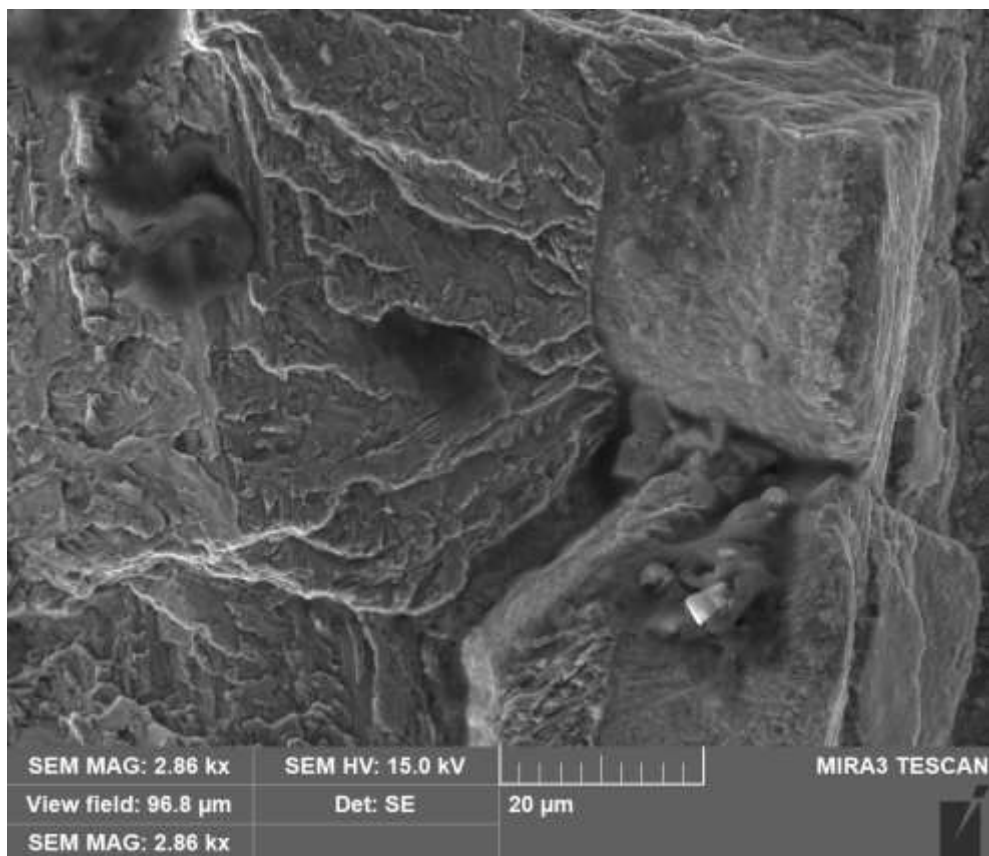
Obr. 12.12-4 Lomová plocha ZT



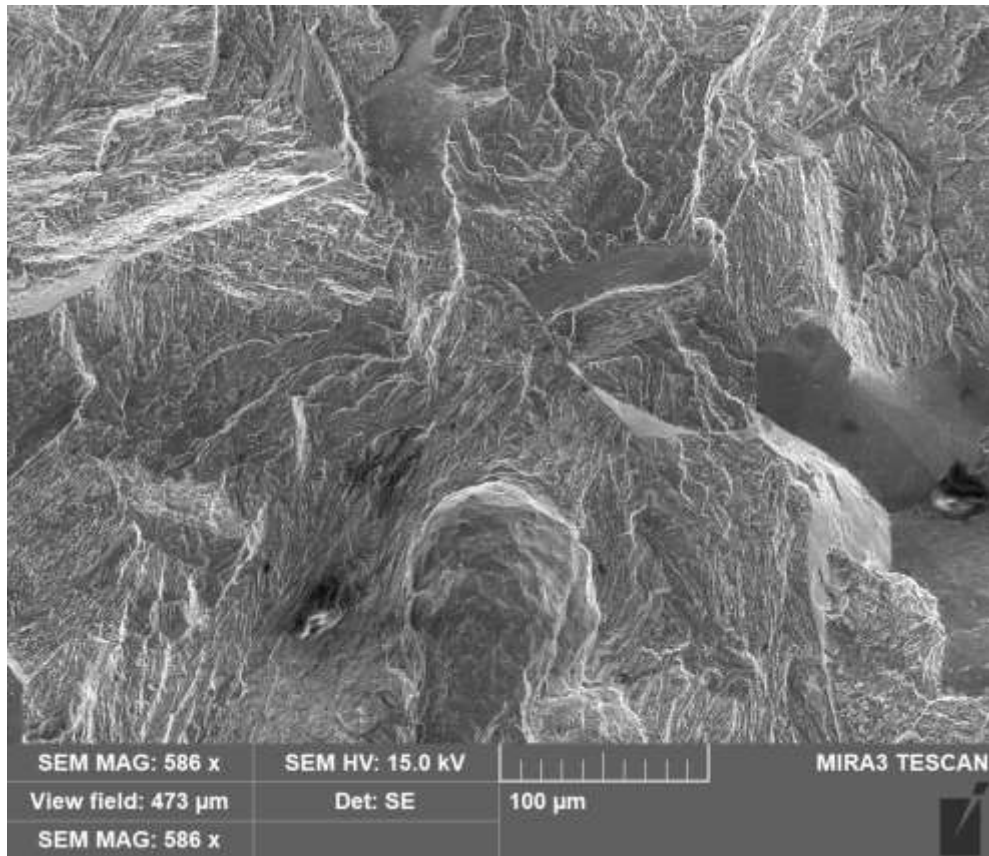
Obr. 12.12-5 Vrub



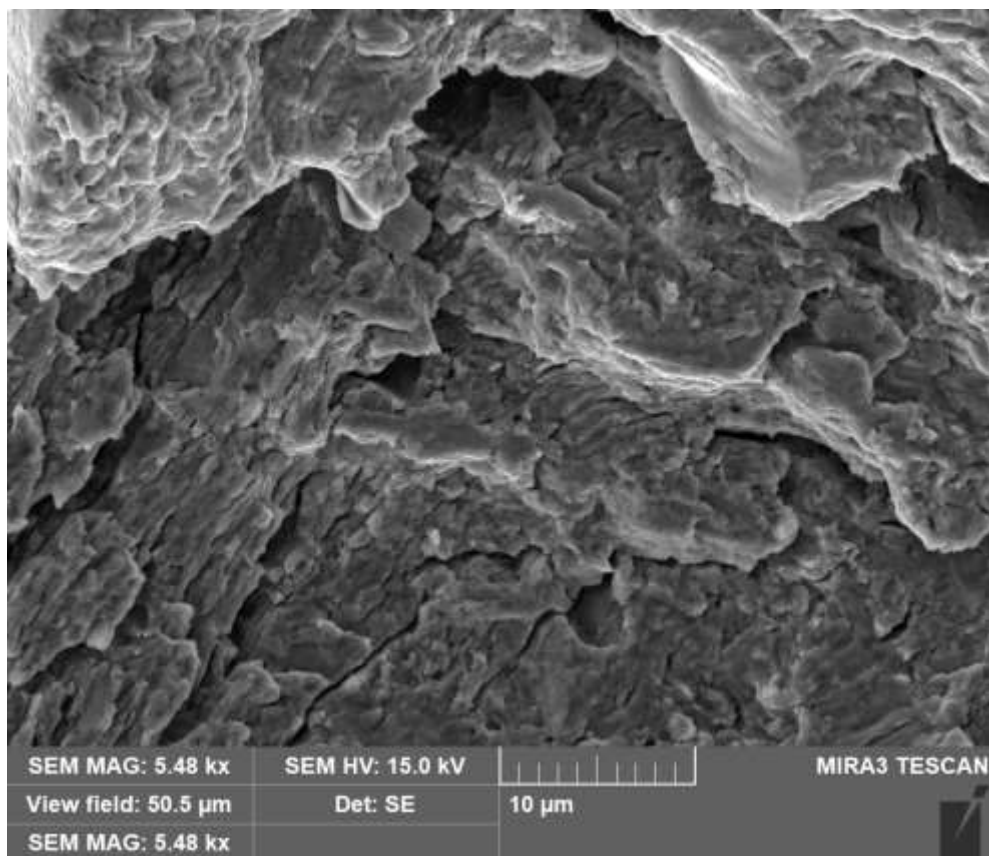
Obr. 12.12-6 Hrana vrubu



Obr. 12.12-7 Bok vrubu



Obr. 12.12-8 Kořen vrubu



Obr. 12.12-9 Striační linie 1,9 mm od ohniska