

# TECHNOLOGIE LASER SHOCK PEENING PRO OPRAVU TURBÍNOVÝCH LOPATEK POŠKOZENÝCH DŮLKOVOU KOROZÍ

## LASER SHOCK PEENING TECHNOLOGY FOR REPAIRING TURBINE BLADES DAMAGED BY PITTING CORROSION

Josef Strejcius <sup>a)</sup>, Zbyněk Špirit <sup>a)</sup>, Jan Brajer <sup>b)</sup> a Jan Kaufman <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o.

<sup>b)</sup> Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

### Abstrakt

V příspěvku je hodnocena únavová pevnost martenzitické oceli Böhler T 552 používané na výrobu oběžných lopatek L-1 nízkotlakých stupňů parních turbín. Zkoušky vysoko cyklové únavy byly provedeny na zkušebních tělesech s leštěným povrchem bez vad a vzorcích s umělými vadami (důlky hloubky 500  $\mu\text{m}$ ) na vzduchu a v parním kondenzátu při namáhání tah-tlak a předpětí 300 MPa. Povrch zkušebních tyčí s vadami byl v místě důlků zpevněn technologií Laser Shock Peening s ochrannou absorpční vrstvou (LSP). Únavová pevnost tyčí s vadami ošetřenými technologií LSP je výrazně vyšší než pevnost vzorků s vadami bez LSP a blíží se hodnotě stanovené pro materiál bez vad. Korozně-únavová pevnost v parním kondenzátu vzorků s vadami je po aplikaci LSP vyšší než únavová pevnost vzorků s důlky bez LSP na vzduchu.

### Abstract

The paper evaluates the fatigue strength of the martensitic steel Böhler T552 used for the production of moving L-1 blades of low-pressure steam turbine stages. High cycle fatigue tests were performed on test specimens without defects with a polished surface and samples with artificial defects (pits with a depth of 500  $\mu\text{m}$ ) in air and the water condensate under tensile-compressive stresses and pre stress of 300 MPa. The surface of the test bars with defects was locally strengthened – in the place of the pits - by shock waves, which were generated by confining the laser-induced plasma (by technology laser shock peening with protective layer). The fatigue strength of bars with defects treated with LSP technology is significantly higher than the strength of samples without LSP and is close to the value determined for the material without defects. Corrosion-fatigue strength in steam condensate of samples with defects is higher after application of LSP than fatigue strength of samples with pits without LSP in air.

### Úvod

U provozovatelů parních turbín existuje silná finanční motivace k dosažení maximální životnosti oběžných lopatek poškozených důlkovou korozí. Pokračující povoz lopatek napadených bodovou korozí je však spojen s rizikem vzniku a rozvoje únavových trhlin, selhání (vy-lomení) oslabené lopatky a následného velkého poškození v turbíně. Tomuto je nutno se vyhnout, protože náklady na opravu by téměř jistě převýšily finanční dopady předčasné výměny lopatkové řady. Při využití metodiky stanovení rizika únavového lomu na základě definování maximální přípustné velikosti důlku jako funkce jeho polohy na povrchu lopatky je možno výměnu lopatek plánovat a minimalizovat tak kapitálové výdaje [1].

Za současného stavu poznání převládá názor, že za provozu korozní důlky na lopatkách nevznikají ani nerostou. Za tohoto předpokladu je možno na korozní důlek pohlížet jako na pouhý koncentrátor napětí. Při kmitání oběžných lopatek koncentrace napětí na vrubu kritické velikosti vede k iniciaci a následnému šíření únavové trhliny. Metodou Laser Shock Peening je možno docílit přerozdělení napětí na povrchu lopatky tím způsobem, že v okolí defektu jsou vnesena tlaková zbytková napětí. Za přítomnosti tlakového zbytkového napětí se únavová trhlina v lopatce velmi obtížně iniciuje i šíří a tím je upozaděn vliv vrubu jakožto koncentrátoru

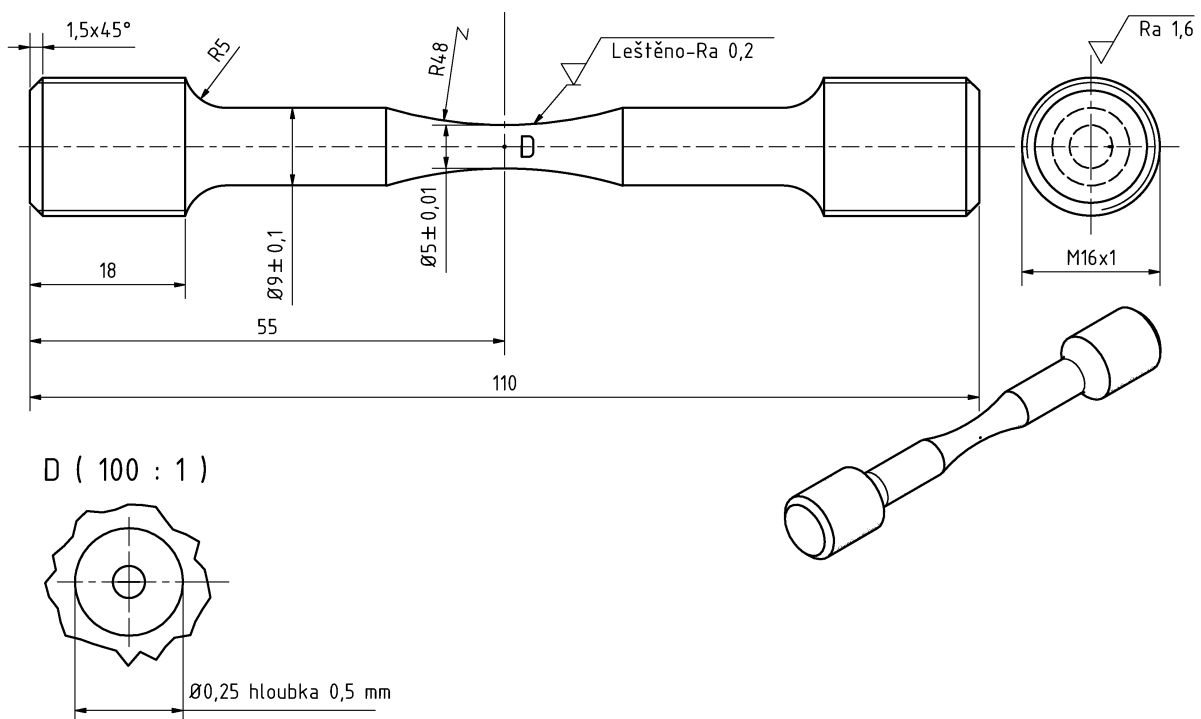
napětí. Působením tlakových zbytkových napětí v okolí důlků se tak zvýší únavová životnost korozně napadené lopatky téměř na původní hodnotu odpovídající životnosti bez korozního napadení. Předmětem této práce je prověření možnosti oprav turbínových lopatek založený na lokálním zpevnění materiálu (v místě korozních důlků) působením rázové mechanické vlny generované interakcí paprsku výkonného pulzního laseru s povrchem lopatky. Ověření bylo provedeno pro lopatkovou ocel Böhler T 552 používanou firmou Doosan Škoda Power s.r.o. na výrobu oběžných lopatek L-1 řad nízkotlakých stupňů parních turbín.

### Experimentální materiál

Materiál EN DIN 1.4938 (Böhler T552; 1.4933; 1.4939 – Böhler T552 EXTRA) je vysoko-  
legovaná chromová ocel odolná proti korozi a tečení používaná v zušlechťeném stavu se standardními mechanismy zpevnění. Vykazuje jak vysokou creepovou pevnost, tak vysokou houževnatost. Používá se na vysoce namáhané díly, jako jsou turbínové lopatky a disky, šrouby, svorníky a prstence. Je určena pro aplikace se stálou teplotou nepřesahující 560 °C.

Materiál byl dodán ve formě válcované tyčoviny 110 x 80 x 500 mm v zušlechťeném stavu. Tepelné zpracování bylo následující: kalení 1040 °C / 1 hodina / olej, popouštění 620 °C / 5 hodin / vzduch, žíhání na odstranění pnutí 580 °C/4 h/vzduch. Chemické složení, mechanické vlastnosti a výsledky metalografické analýzy jsou uvedeny ve zprávě autorů Kasl a kol. [2]. Mikrostruktura oceli je jemnozrnná, bez  $\delta$ -feritu či volného feritu, tvořená popuštěným martenzitem; hranice zrn jsou místy zvýrazněné drobnými karbidy.

Pro zkoušky vysoko cyklové únavy (VCÚ) byla použita zkušební tělesa s geometrií pracovní části typu „přesýpací hodiny“ dle výkresu na obr. 1. Zkušební tělesa byla vyrobena třískovým obráběním. Povrch byl ručně přešetřen metalografickými papíry s finální zrnitostí P2000. Podélná osa symetrie zkušebních těles byla rovnoběžná s vlákny válcovaného profilu.

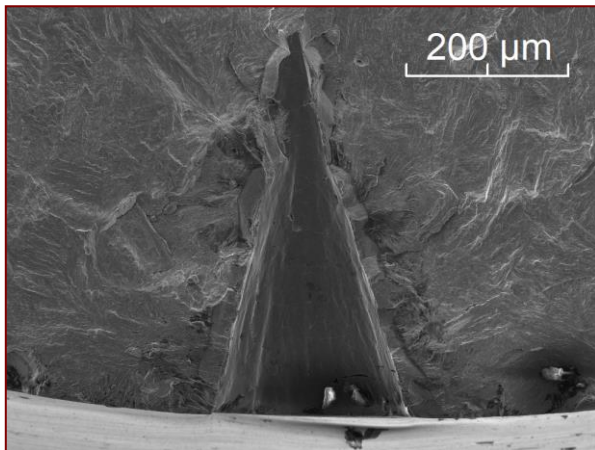


Obr. 1: Zkušební tělesa pro zkoušky VCÚ

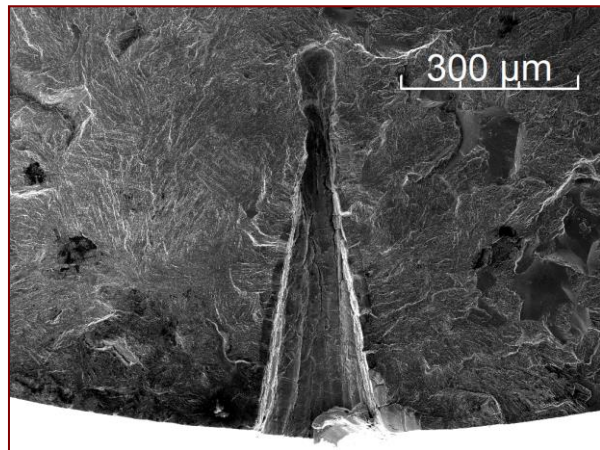
V pracovní části zkušebních vzorků pro VCÚ byly vytvořeny umělé vady – defekty imitující korozní pitting. Pro simulaci efektu korozního důlku za kontrolovaných a opakovatelných podmínek byla koroze nahrazena laserovým vrtáním. Ve středu vzorku, v místě jeho nejmenšího průřezu, kolmo k jeho povrchu, byla vytvořena malá dírka ve tvaru kužele, která měla hloubku 500  $\mu$ m a průměr 250  $\mu$ m na povrchu. Byl použit laser s dobou trvání pulsu 3 ns, energie 50 mJ

a opakovací frekvence 500 kHz. Laserový svazek měl průměr 39  $\mu\text{m}$ . Aby se dosáhlo požadovaného průměru bodu, laserový spot se systematicky pohyboval spirálovitě, od okrajů směrem ke středu. Rychlost pohybu byla 700 mm/s. Během vrtání byl ohřev vzorku disipativním teplem produkovaným laserovou absorpcí nevýznamný.

Na obr. 2 a obr. 3 jsou snímky lomových ploch vzorků po testech VCÚ. Z obrázků je dobře vidět, že vyvrtané otvory mají tvar ostrých kuželů, vnitřní povrchy jsou relativně hladké, pokryté slabou vrstvou přetaveného materiálu. Důlky série zkušebních tyčí testovaných v kondenzátu měly hloubku cca 650  $\mu\text{m}$ , byly hlubší než důlky na vzorcích testovaných na vzduchu. Rozdíl v hloubce důlků nebyl záměrný, série vzorků pro zkoušky v parním kondenzátu byla vyrobena s časovým odstupem a s patrně pozmeněnými parametry nastavení vrtacího laseru.



Obr. 2: Geometrie vady imitující korozní důlek ve zkušebních tyčích pro testy VCÚ na vzduchu



Obr. 3: Geometrie vady imitující korozní důlek ve zkušebních tyčích pro testy VCÚ parním kondenzátu

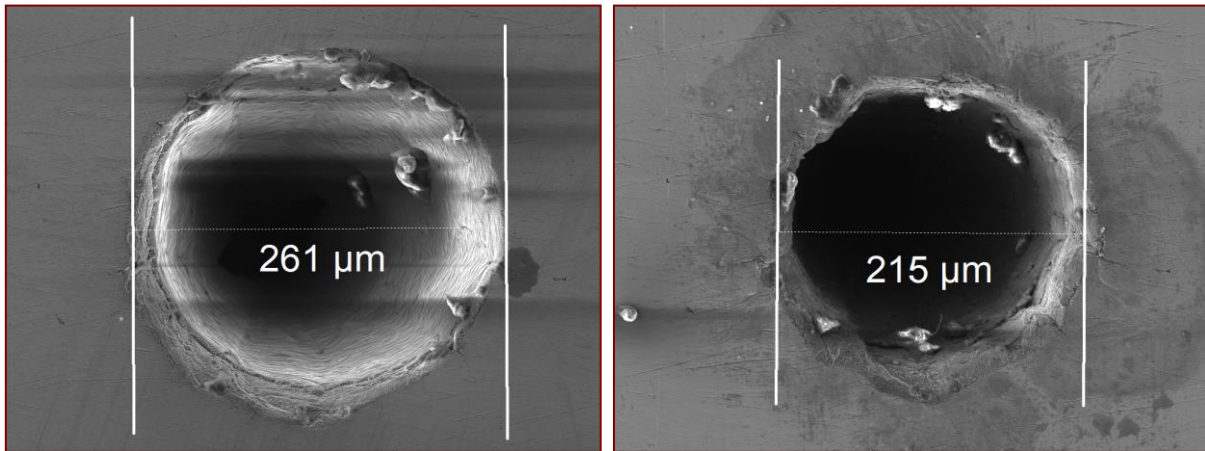
### Laser Shock Peening

Laser Shock Peening (LSP) je moderní bezkontaktní technologie zpevňování povrchu kovových materiálů na principu vzniku rázových vln, které se generují během interakce krátkých laserových pulzů s povrchem materiálu. Rázové vlny v materiálu vyvolávají strukturní změny, které mají za důsledek vznik zbytkového tlakového napětí. Vnesené tlakové napětí obecně zlepšuje únavové vlastnosti materiálu, brání vzniku a šíření trhlin [3].

Únavové zkušební vzorky s vyvrtanými důlky imitujícími pitting byly za účelem přesného zaměření laserového paprsku fixovány na robotické rameno M-20iA / 20M Fanuc. Důlek a přilehlý povrch byl přelepen černou vinylovou páskou od firmy 3M s tloušťkou 130  $\mu\text{m}$ . Povrch vzorku v oblasti dopadu laserového paprsku byl navíc kryt laminárně stékající vodou tvořící v místě dopadu cca 1 mm tlustou vrstvou. Vinylová páska napomáhá absorpci laserového záření, ale hlavně pak chrání povrch vzorku před tepelnými jevy, které doprovázejí dopad laserového pulzu. Působení na vzorek je pak čistě mechanického rázu. K modifikaci povrchu zkušebních vzorků byl použit laserový systém Solis State s diodovým čerpáním. Laserový svazek měl čtvercový profil s obdélníkovým časovým průběhem. Paprsek s vlnovou délkou 1030 nm měl energii v pulzu 4 J, s dobou trvání 10 ns. Paprsek byl fokusován na čtvercovou stopu se stranou 2 mm. Výsledná hustota výkonu byla 10  $\text{GW}/\text{cm}^2$ .

S danými parametry laseru byl zpevněn povrch zkušebních těles v místě umělých bodů. Za tímto účelem byly zvoleny dvě odlišné strategie rozložení jednotlivých laserových pulzů po povrchu zkušebních těles. Při strategii LSP1 byly použity tři pulsy, u LSP2 devět. Na obr. 4 je detail ústí umělého důlku v pracovní části zkušební tyče před aplikací LSP. Na obr. 5 je detail

téhož důlku po LSP, bez známek tepelného ovlivnění, vzniku trhlin, nerovností. Plastická deformace v ošetřené oblasti je dobře patrná, po modifikaci povrchu se viditelný průměr důlku zmenšil o cca 40  $\mu\text{m}$ .

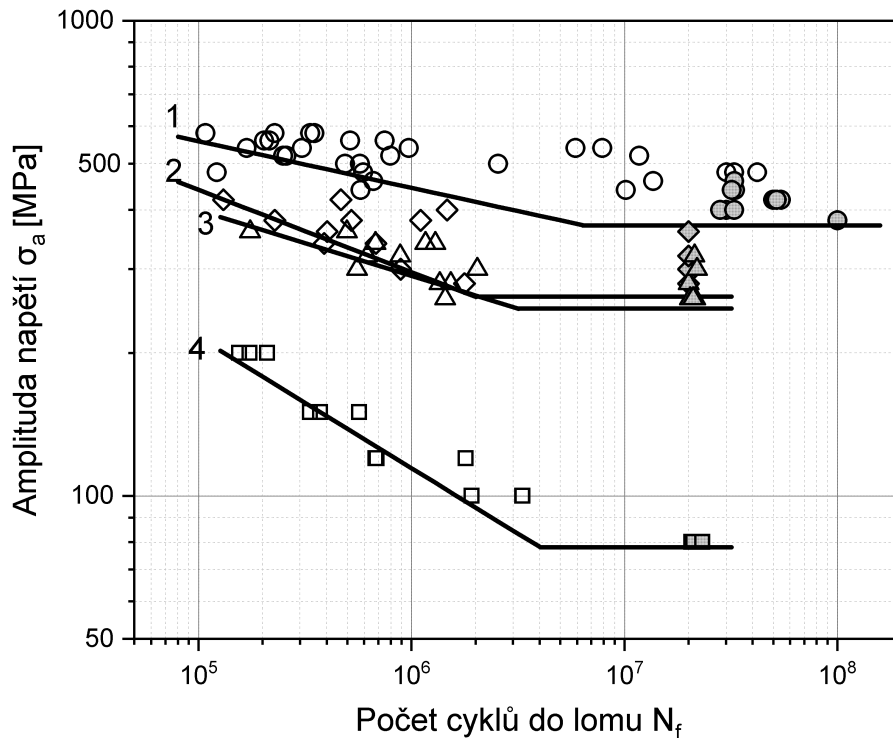


Obr. 4: Detail ústí umělého bodu před LSP      Obr. 5: Detail ústí umělého bodu po LSP

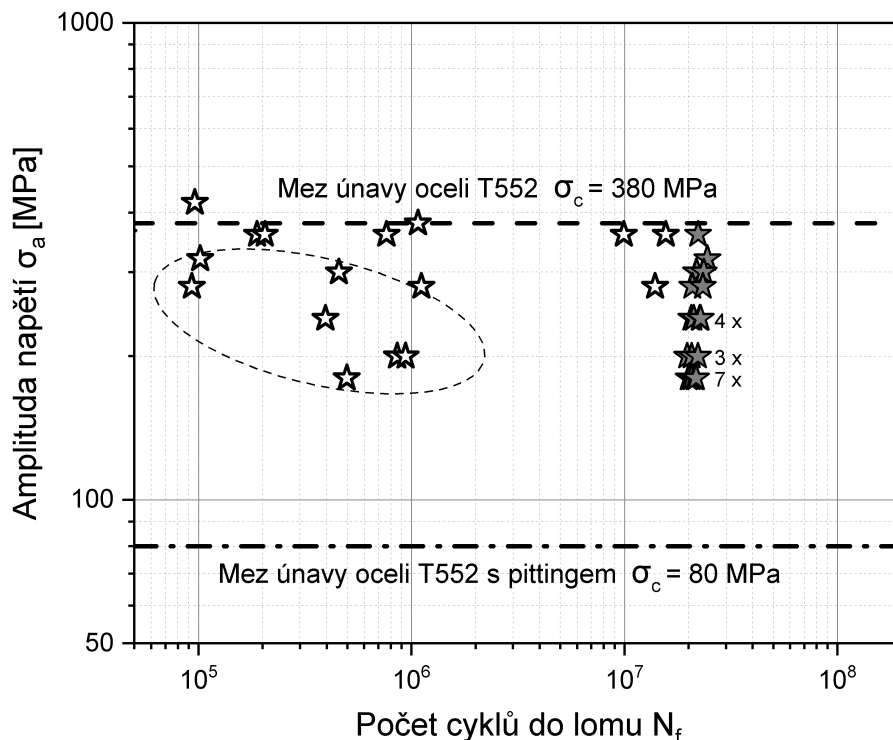
### Výsledky zkoušek vysokocyklové únavy a diskuze

Měření vysokocyklové únavy na vzduchu bylo provedeno v tahu-tlaku při středním napětí  $\sigma_m = 300 \text{ MPa}$  a frekvenci cca 125 Hz na elektromagnetickém pulzátoru se silovou kapacitou 250 kN. Výsledné Wöhlerovy křivky jsou vyneseny v grafu na obr. 6. Měřením na sérii zkušebních těles bez vad byla stanovena mez únavy oceli T552  $\sigma_c = 380 \text{ MPa}$ . Umělé vady měly za následek razantní snížení únavové pevnosti – časovaná mez únavy klesla na cca 80 MPa. Aplikace technologie LSP na zkušební tyče s vadami vedla k výraznému zvýšení únavové pevnosti, pro variantu strategie LSP1 byly stanovena mez únavy  $\sigma_c = 240 \text{ MPa}$ , pro variantu LSP2  $\sigma_c = 260 \text{ MPa}$ .

Měření vysokocyklové únavy ve vodním kondenzátu bylo provedeno za stejných podmínek mechanického zatěžování jako u zkoušek na vzduchu. Zkušební vzorek byl zatěžován v průtočné korozní cele. Zkušební medium byla demineralizovaná voda s obsahem chloridů v řádu jednotek ppm, teplota 100 °C, kyslík redukován varem. Výsledky zkoušek vysoko cyklové únavové pevnosti oceli T552 s umělými body ošetřenými LSP2 je na obr. 7.



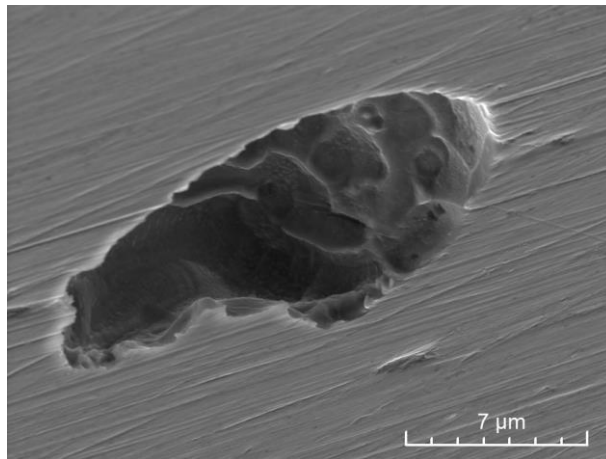
Obr. 6: Testy VCÚ oceli T552 na vzduchu, tah /tlak, střední předpětí 300 MPa: 1. vzorky bez defektu, leštěný povrch, 2. vzorky s umělým pittingem + LSP2, 3. vzorky s umělým pittingem + LSP1, 4. vzorky s umělým pittingem



Obr. 7: Test VCÚ oceli T552 v parním kondenzátu, tah /tlak, střední předpětí 300 MPa, vzorky s umělým pittingem + LSP2

Při zkouškách únavy v inertním prostředí (na vzduchu) bylo experimentálně prokázáno, že technologie LSP může do značné míry účinně eliminovat vliv koncentrátorů napětí. Výsledky únavových zkoušek vykazují určitý rozptyl, v některých případech se životnost peenovaných vzorků blížila hodnotám zaznamenaným u vzorků bez defektů. Tento rozptyl může být dán

vlastnostmi základního materiálu, který též vykazoval velký rozptyl v životnosti vzorků zatěžovaných na stejných napětových hladinách a souvisel s mikročistotou oceli. Také užitý postup provedení peenování byl zvolen bez hlubšího modelování podmínek napjatosti v okolí bodu, bez zhodnocení vlivu geometrie zkušební tělesa na šíření rázové vlny apod. Je pravděpodobné, že optimalizací provozních parametrů by se dosáhlo ještě lepšího výsledku. V případě zkoušek v parním kondenzátu je rozptyl v životnosti zkušebních vzorků ještě větší. Nižší zjištěné pevnostní hodnoty jsou způsobeny korozi – viz obr. 8.



Obr. 8: Lokální korozní napadení – pitting povrchu zkušební tyče po zkoušce VCÚ

## Závěr

Únavová pevnost tyčí s vadami ošetřenými technologií LSP je výrazně vyšší než pevnost vzorků s vadami ale bez LSP a blíží se hodnotě stanovené pro materiál bez vad. Korozně-únavová pevnost v parním kondenzátu vzorků s vadami je po aplikaci LSP vyšší než únavová pevnost vzorků s důlky bez LSP na vzduchu.

## Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/ 2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293.

## Literatura

- [1] EPRI (2015): *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*. Final Report 3002005107, EPRI, Palo Alto (CA).
- [2] Kasl, J., Špirit, Z, Strejcius, J., Svoboda, J. (2017): *Fraktografický rozbor lomových ploch únavových zkoušek lopatkových materiálů v korozním prostředí – katalog lomových ploch*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-52/17/070, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [3] Špirit, Z., Kaufman, J., Brajer, J., Strejcius, J., Chocholoušek, M. (2019): *Zvýšení únavové životnosti materiálů metodou laser shock peening*. 14. konference *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 171-176. ISBN 978-80-261-0885-6