

ANALÝZA PŘÍČIN POŠKOZENÍ OBĚŽNÉHO KOLA ČERPADLA V JE TEMELÍN

ANALYSIS OF THE CAUSES OF IMPELLER DAMAGE IN NPP TEMELÍN

Miroslav Krpec, Dana Tonarová, Petr Brabec a Marek Postler

ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

Abstrakt

Při revizi čerpadla SULZER 200-450 byla na oběžném kole 2TQ32D01 na základě vizuální a kapilární kontroly zjištěna na jedné z pěti lopatek trhlina. Oběžné kolo bylo za účelem stanovení příčin poškození převezeno k destruktivnímu hodnocení do ÚJV Řež, a. s. Destruktivním hodnocením bylo zjištěno únavové poškození lopatky. Hodnocení bylo komplexně doplněno ověřením chemického složení materiálu, odporovou tenzometrií a stanovením základních mechanických vlastností.

Abstract

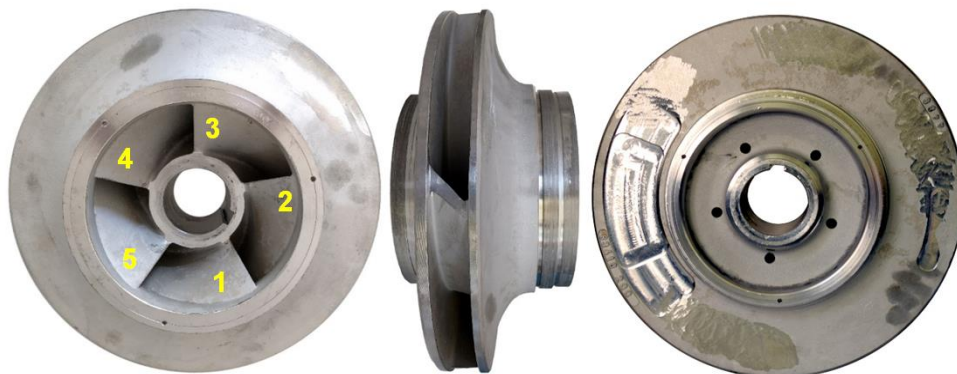
During the revision of the pump SULZER 200-450 of the impeller 2TQ32D01, a crack was detected on one of the five blades based on visual and capillary inspection. In order to determine the causes of damage, the impeller was transferred to ÚJV Řež. Destructive evaluation revealed fatigue damage to the blade. The evaluation was comprehensively supplemented by verification of the chemical composition of the material, resistance tensometry and determination of basic mechanical properties.

Úvod

Na JE Temelín byla při revizi čerpadla SULZER 200-450 u oběžného kola 2TQ32D01 (obr. 1) na základě vizuální a kapilární kontroly zjištěna na jedné z pěti lopatek trhlina. Trhlina se šířila z náběhové hrany lopatky v oblasti rádiusu, těsně pod povrchem velkého průměru. Kapilární zkouškou nepoškozených lopatek byla na jedné z lopatek v identickém místě zjištěna další trhlina.

Zbylé lopatky byly bez indikací. Dle informací zadavatele pracuje kolo v několika různých režimech a historie nálezů sahá až do roku 2005, kdy bylo stejné poškození identifikováno u dalších dvou oběžných kol. Před destruktivním hodnocením bylo oběžné kolo nejprve naskenováno do 3D modelu a poté bylo pomocí odporové tenzometrie na jedné z lopatek provedeno měření vnitřního pnutí. Měření byla prokázána poměrně vysoká úroveň zbytkového napětí až 100 MPa.

Nedestruktivní a destruktivní analýzy provedené za účelem stanovení příčin poškození oběžného kola 2TQ32D01 s trhlinami z JE Temelín jsou předmětem tohoto příspěvku.



Obr. 1: Poškozené oběžné kolo čerpadla 2TQ32D01

Čerpadlo SULZER – REL 200-450 [1]

Čerpadlo typ SULZER – REL 200-450 je nízkotlaké odstředivé horizontální jednostupňové čerpadlo, průtokové pouze jedním směrem, s axiálním vstupem a radiálním výstupem a letmo uloženým oběžným kolem. Vnitřní komora čerpadla je u hřídele zapečetěna mechanickými ucpávkami. Těleso ucpávky je složeno ze dvou mechanických ucpávek (vnitřní a vnější). Prostor mezi ucpávkami je zaplněn blokovací kapalinou (bariérou) -čistým kondenzátem a je v něm udržován tlak minimálně o 0,2 MPa vyšší, než je tlak v sání. Tím je dosaženo dokonalejší utěsnění vnějšího kluzného kroužku a prakticky zabráněno prosakování přečerpávané kapaliny.

Tab. 1: Základní parametry nízkotlakého čerpadla

Základní parametry	HVB II
Průtok Q	800 m ³ /hod
Výtlak	2,3 MPa
Otáčky	2980 ot./min
Povolená kavitační rezerva	≤ 9,5 m
Tlak na sání	0,095 ÷ 2,25 MPa
Teplota čerpaného média	10–150 °C
Výkon čerpadla	668 kW
Výkon elektromotoru	800 kW
Napětí	6 kV

Provozní režimy čerpadla

Nízkotlaký systém je využíván v následujících režimech:

- režim dochlazování aktivní zóny reaktoru – tlak na sání až 2,2 MPa, Q = 800 m³/hod.,
- režim plánovaného dochlazování aktivní zóny reaktoru – tlak na sání až 1,7 MPa, Q = 450 m³/hod.,
- režim odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny reaktoru – tlak na sání 0,4 MPa, Q = 450 m³/hod.,
- zkouška na recirkulaci (1 x 3 měsíce) – tlak na sání 0,11 MPa, Q = 270 m³/hod.

Použité metody hodnocení

Nedestruktivní hodnocení bylo zaměřeno na:

- provedení vizuální a kapilární kontroly nepoškozených lopatek,
- měření chemického složení materiálu oběžného kola.

Pro destruktivní analýzy bylo navrženo:

- měření vnitřního pnutí pomocí odporové tenzometrie,
- fraktografické hodnocení lomových ploch trhliny lopatky 1 a 2,
- metalografické hodnocení mikrostruktury ZM v oblasti trhlin,
- stanovení základních mechanických vlastností statickou zkouškou v tahu.

Vizuální a penetrační zkouška byla prováděna certifikovanou osobou ve stupni 2, dle STD 101 APC, ČSN EN ISO 9712:2013. Vizuální kontrola oběžného kola čerpadla 2TQ32D01 byla provedena jako přímá kontrola dle ČSN EN 13018, Nedestruktivní zkoušení – Vizuální kontrola – Všeobecné zásady. Kapilární zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 3452-1, Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady.

Složení materiálu bylo stanoveno metodou optické emisní spektrometrie (OES), která je akreditovanou zkouškou zkušební laboratoře oddělení Podpora provozu energetických zařízení (ZL OPPEZ), měření bylo provedeno mobilním OES přístrojem ARCMET 8000 SL MobileLab, výrobce Oxford Instruments. Stanovení chemického složení materiálu bylo standardně prováděno na bázi série 10 měření. Na povrchu tělesa byla v oblasti měření vybroušena plocha o minimálním rozměru 10 x 10 cm. Broušení bylo provedeno SiC brusným papírem zrnitosti 60 pomocí úhlové brusky.

Ve vybraných místech byly po ručním obroušení a očištění povrchu chemicky čistým acetonem nalepeny rychle tuhnoucím tmelem Hottinger X60 tenzometry Micro Measurements typu CEA-06-125UN-120 s odporem 120 Ω a deformační citlivostí $k = 2,09$. Stanovení deformací bylo provedeno digitální tenzometrickou aparaturou HBM DMD 20A [2], v polo můstkovém zapojení po doplnění měrného tenzometru přesným teplotně stabilním kompenzačním odporem Vishay M–M typu S-120-01.

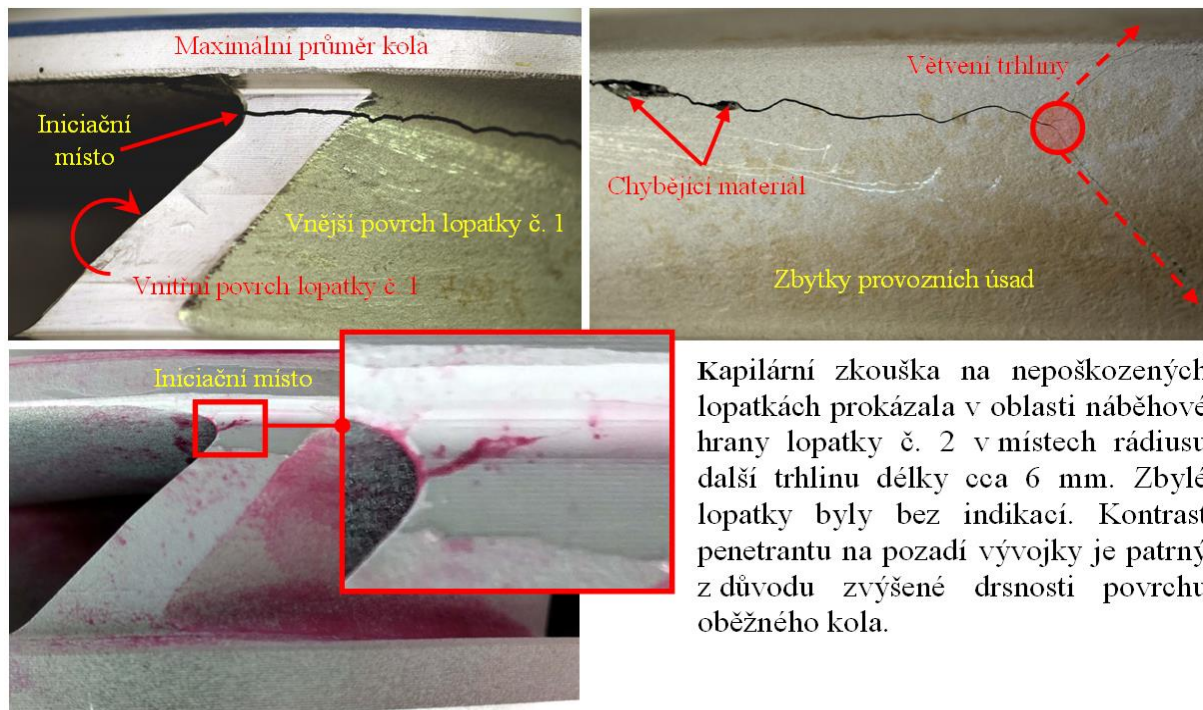
Fraktografické hodnocení lomových ploch oběžného kola čerpadla 2TQ32D01 bylo provedeno na SEM VEGA TS 5130 XM (fy. Tescan Brno a.s.) v sekundárních (SE) a zpětně odražených elektronech (BSE). Dokumentace byla pořízena při zvětšení 70x až 5000x.

Metalografické výbrusy pro hodnocení mikrostruktury byly připraveny standardním způsobem, tj. mechanickým broušením na metalografických papírech o zrnitosti 500–2400, leštěním pomocí diamantové pasty (zrnitost D 3 a D 0,7) a koloidní silice (OPS Struers). Pro dokumentaci mikrostruktury materiálu a zvýraznění karbidických vměstků byl výbrus elektrolyticky leptán v 10% kyselině šťavelové. Pro zvýraznění δ -feritu byla použita 60% kyselina dusičná nebo leptadlo Kalling.

Pro statickou zkoušku v tahu bylo z oblasti poškozené lopatky vyrobeno celkem 5 tahových ZT. Pro zkoušku bylo použito zařízení TS 3, fy. ARPO a. s. Praha, ev. č. 83360. Normy, podle kterých byly experimenty provedeny: ČSN EN ISO 6892-1 – Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty.

Výsledky

Trhlina se šířila z náběhové hrany lopatky č. 1 v oblasti rádiusu, těsně pod povrchem velkého průměru do délky cca 110 mm, kde došlo k jejímu větvení (obr. 2). Větvící se trhliny byly vůči sobě orientovány pod úhlem cca 90° a jejich délky dosahovaly od 15 do 30 mm. Délka trhliny na vnitřní straně lopatky byla cca 105 mm. V délce 55 a 65 mm od náběhové hrany byly patrné chybějící části materiálu, jejichž rozměry byly cca 8 x 2,5 mm, resp. 2 x 1,5 mm.



Kapilární zkouška na nepoškozených lopatkách prokázala v oblasti náběhové hrany lopatky č. 2 v místech rádiusu další trhlínu délky cca 6 mm. Zbylé lopatky byly bez indikací. Kontrast penetrantu na pozadí vývojky je patrný z důvodu zvýšené drsnosti povrchu oběžného kola.

Obr. 2: Oblast iniciace trhliny lopatky č. 1 a kapilární hodnocení lopatky č. 2

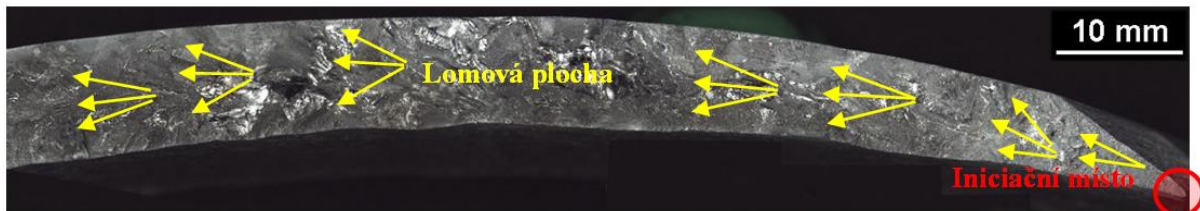
Měření chemického složení materiálu oběžného kola bylo zjištěno, že se pravděpodobně jedná o litou austenitickou chrom-nikl-molybdenovou ocel s označením CF-3M (316L) s nízkým obsahem uhlíku. Srovnání deklarovaného a naměřeného chemického složení udává tab. 2.

Tab. 2: Základní parametry nízkotlakého čerpadla

Měření č. / obsah [hm. %]	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
CF-3M dek.	max. 0,03	max. 1,50	max. 1,50	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	2,0 – 3,0	max. 0,04	max. 0,04
2TQ32D01	0,035	1,32	1,20	17,98	10,63	2,19	0,022	0,015

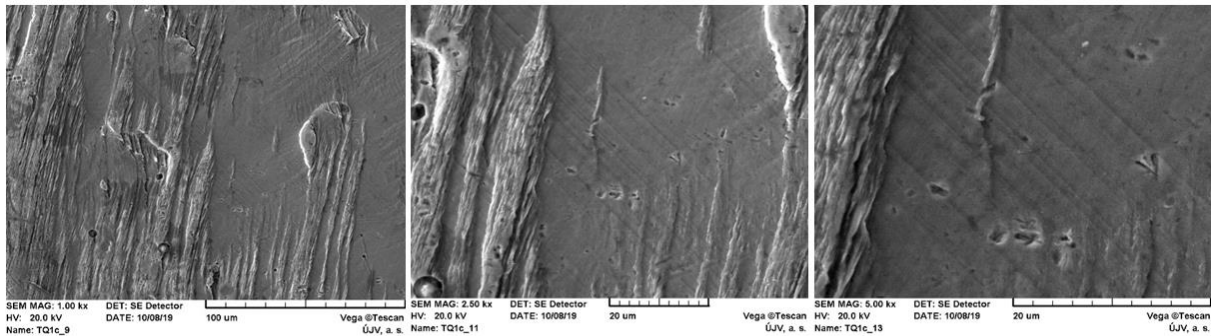
Pro přímé stanovení zbytkového napětí v patě lopatky č. 4, byla využita možnost destruktivního postupu. Při plánovaném postupu řezání kola strojní pásovou pilou PEGAS 360x500 GH-LR byl jako první krok proveden řez středem lopatky od náběžné hrany směrem k ose kola. Úplným uvolněním zbytkového napětí rozříznutím lopatky v jejím středu byla prokázána poměrně vysoká úroveň zbytkového napětí 101 MPa.

Makrostruktura lomové plochy vykazovala v celém profilu charakter únavového poškození. Směr šíření trhliny je patrný z obr. 3. Informace z oblasti iniciace v místech rádiusu náběžné hrany lopatky a přilehlého okolí bylo znemožněno deformací plochy, která se v těchto místech vyskytovala.



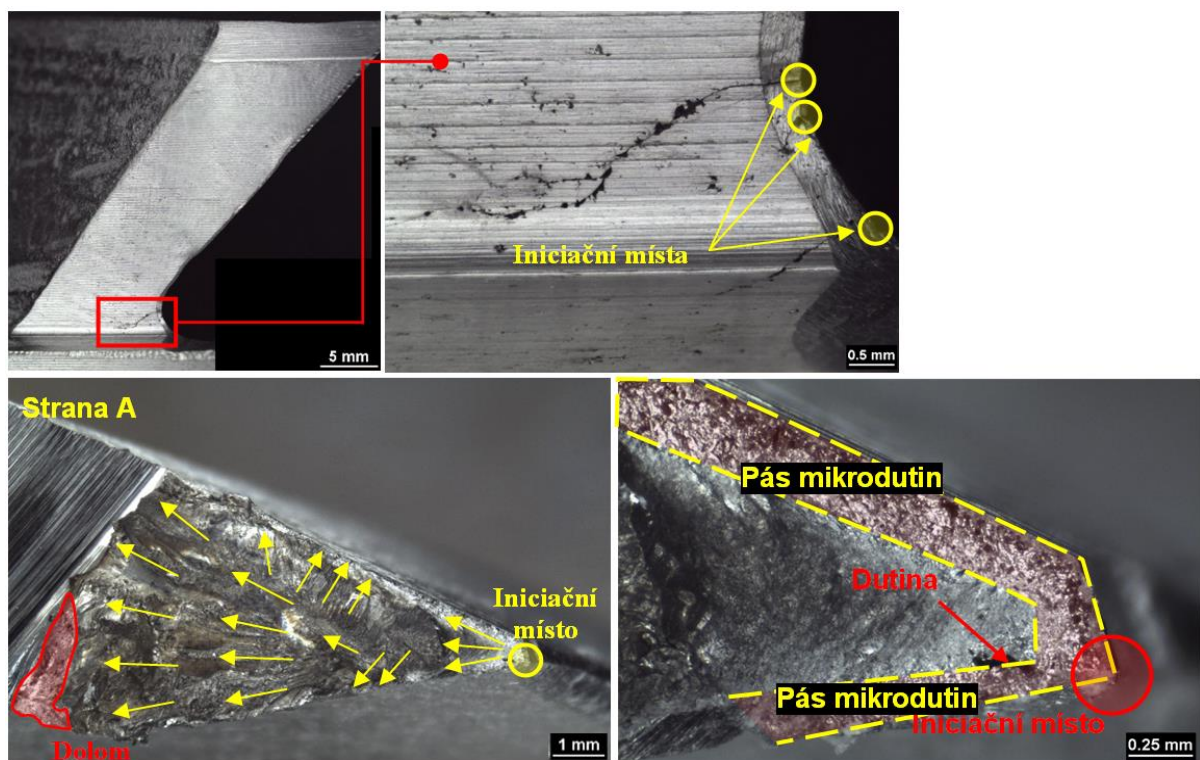
Obr. 3: Lomová plocha trhliny s vyznačením šíření trhliny a iniciačním místem, lopatka č. 1

Detailní hodnocení mikrostruktury lomové plochy v SEM potvrdilo únavové poškození s výskytem striací (obr. 4), které byly nejvíce patrné na čele trhliny v blízkosti do lomu. Mikroskopická charakteristika lomu odpovídala projevům korozního únavového šíření vady. Na povrchu lomové plochy byly v početném zastoupení patrné vady typu staženin (ředin).



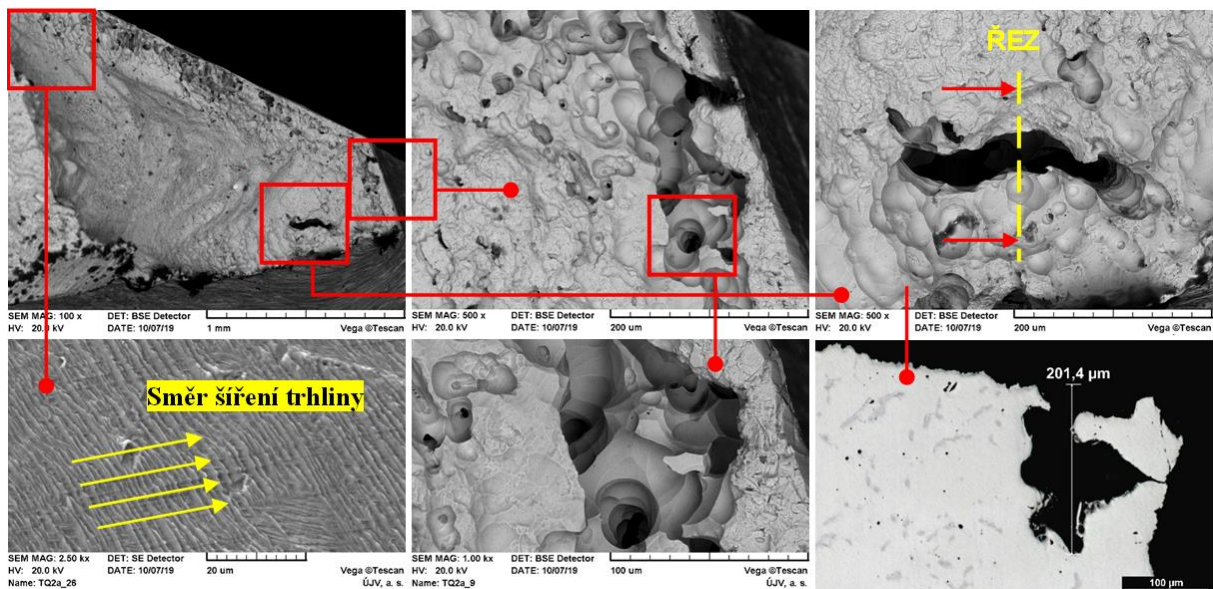
Obr. 4: Únavové striace vyskytující se na čele trhliny lopatky č. 1

Při bližším ohledání lopatky č. 2 se na povrchu v místech rádiusu náběžné hrany lopatky vyskytovaly tři trhliny (obr. 4). Jedna magistralní, větící se, z části vyplněna zbytky úsad a dvě sekundární menších rozměrů, u kterých nebylo větvení patrné. Na stereomikroskopu bylo po rozlomení magistralní trhliny zjevné, že makrostruktura lomové plochy v celém průřezu vykazovala únavový charakter poškození. Směr šíření trhliny je patrný z obr. 5. V místech iniciace byly u vnějšího povrchu patrné mikro dutiny, které v šířce cca 100 až 250 µm obvodově kopírovaly geometrii lopatky a vyskytovaly se od iniciačního místa do vzdálenosti cca 2 mm.



Obr. 5: Trhliny v oblasti rádiusu náběžné hrany lopatky č. 2, lomová plocha s vyznačením šíření trhliny a mikrodotiny v místech iniciace trhliny při povrchu lopatky

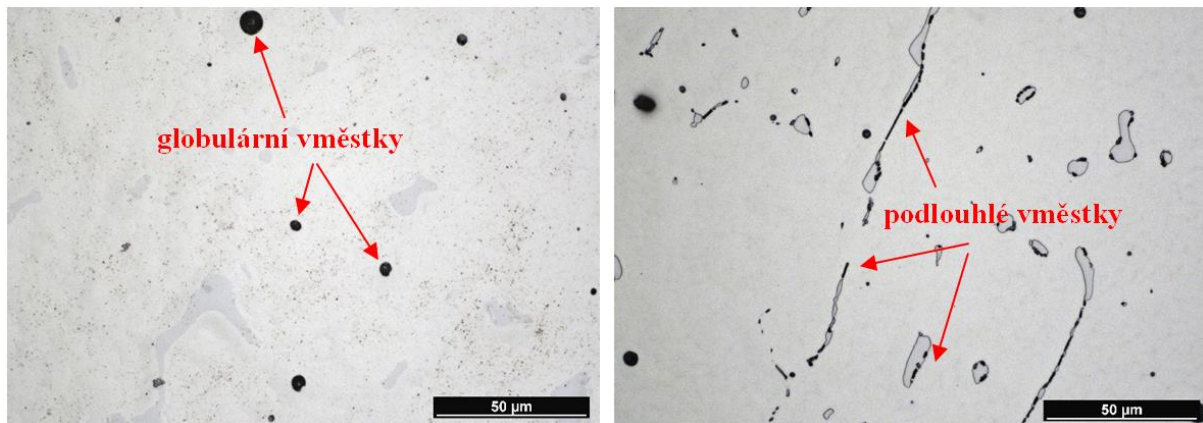
Únavové poškození bylo patrné i při hodnocení v SEM. Striace se vyskytovaly na čele trhliny cca 2 mm od hranice s dolomem a jejich orientace byla kolmo na směr šíření trhliny. Mikroskopická charakteristika lomu odpovídala projevům korozního únavového šíření vady. V místech iniciace trhliny byly při vnějším povrchu patrné vady materiálu – staženiny (řediny), patřící do kategorie dutin. Povrch dutin byl hladký, bez výskytu jakékoliv výplně, jak dokumentuje obr. 6 ve zpětně odražených elektronech (BSE).



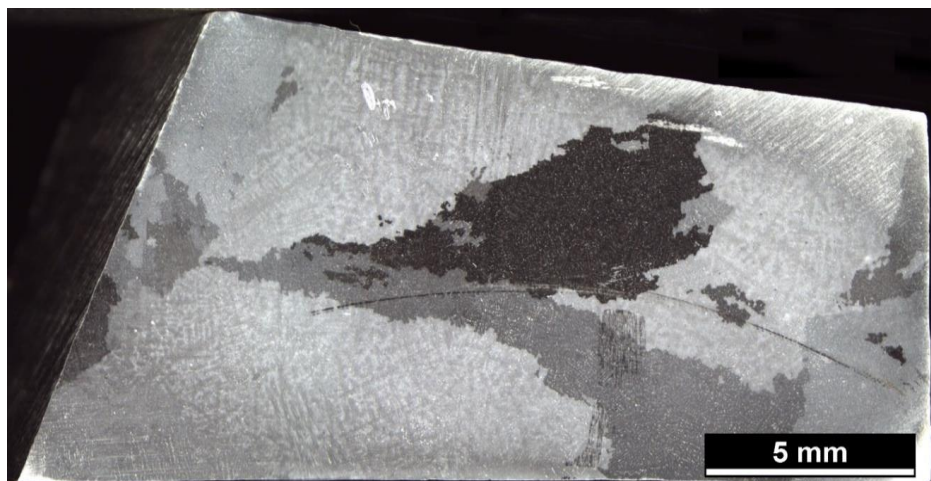
Obr. 6: Striace na lomové ploše a dutiny v místech iniciace trhliny lopatky č. 2, zobrazení v SE a BSE

Hodnocení mikrostruktury bylo provedeno v příčném řezu kolmém na lomovou plochu. V nelepťaném stavu byly v materiálu zřetelné tmavé globulární oxidické vměšky. Po naleptání

materiálu kyselinou šťavelovou byla patrná litá dvoufázová austeniticko-feritická struktura (solidifikace typu AF). Na hranicích δ -feritu došlo k zvýraznění podlouhlých karbidů (obr. 7). Obsah δ -feritu byl v materiálu $14,7 \pm 5,5$ %. Lokálně se podlouhlé vměstky vyskytovaly i v austenitické matici. V austenitické matici byla též patrná dendritická struktura. Velikost strukturních jednotek se pohybovala okolo $\sim 3-10$ μm . Zrna v příčném řezu byla kolumnárního tvaru (obr. 8) a jejich velikost byla v řádu jednotek milimetrů.

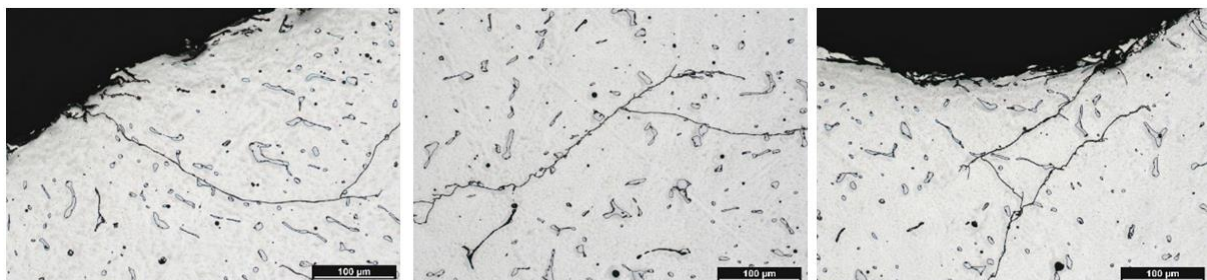


Obr. 7: Globulární oxidické vměstky a podlouhlé karbidické vměstky



Obr. 8: Makrostruktura materiálu, zvětšení 50x

Pod povrchem lomové plochy se v materiálu vyskytovaly sekundární interdendritické trhliny (obr. 9), které se šířily po dendritech v matici austenitu.

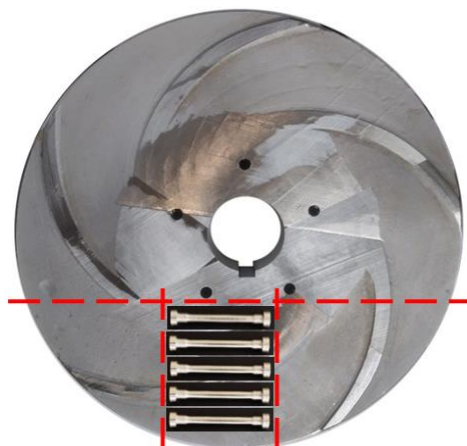


Obr. 9: Sekundární trhliny pod povrchem lomové plochy, leptáno kyselinou šťavelovou, zvětšení 200x

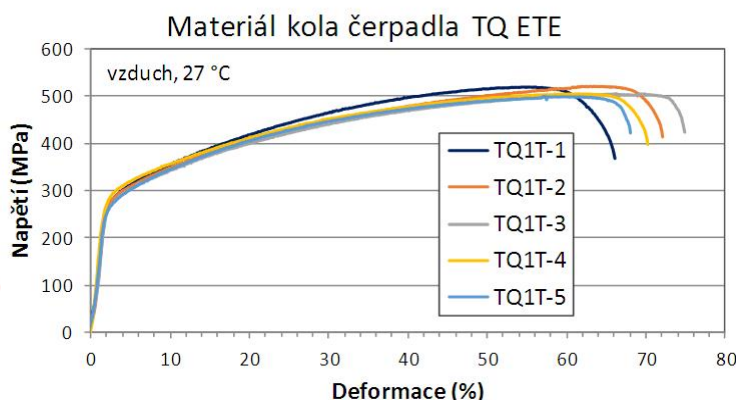
Testy pro získání mechanických vlastností materiálu oběžného kola čerpadla 2TQ32D01 byly prováděny podle pracovních postupů pro konkrétní podmínky ZL OPPEZ (akreditovaná

laboratoř, č. 1039.2), dle ČSN EN ISO 6892-1. Tahová zkouška za pokojové teploty je zkouška danou rychlostí deformace na tahovém ZT na vzduchu (rychlost deformace $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, teplota $24 \text{ }^\circ\text{C}$). Výstupem je napětově-deformační křivka a z ní stanovené hodnoty mechanických vlastností (smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , a celkové prodloužení A).

Pět ZT bylo vyrobeno z oblasti poškozené lopatky č. 1. Orientace ZT vůči tělesu oběžného kola je zobrazena na obr. 10. Grafické znázornění závislosti napětí na deformaci ZT je zobrazeno na obr. 11. Výsledky mechanických zkoušek jsou uvedeny v tab. 3, srovnání deklarovaných a naměřených hodnot v tab. 4.



Obr. 10: Orientace ZT vůči tělesu oběžného kola čerpadla 2TQ32D01



Obr. 11: Grafické znázornění napětí δ [MPa] na deformaci ε [%]

Tab. 3: Hodnoty mechanických vlastností oběžného kola čerpadla 2TQ32D01

ZT	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
TQ1T-1	254	519	63	81
TQ1T-2	256	521	68	72
TQ1T-3	251	512	71	72
TQ1T-4	250	505	67	70
TQ1T-5	251	504	65	72
Průměr + směrodatná odchylka	252 ± 3	512 ± 8	67 ± 3	73 ± 4

Tab. 4: Srovnání mechanických vlastností deklarovaného materiálu CF-3M (316L) a materiálu oběžného kola čerpadla 2TQ32D01

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
CF-3M dek.	min. 205	min. 485	min. 30 %	-
2TQ32D01	252	512	67	73

Ze závislosti napětí na deformaci tahových zkoušek jednotlivých ZT byly patrný velmi malé rozdíly v hodnotách smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, resp. meze pevnosti v tahu R_m , i oblasti tažnosti A a kontrakce Z. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ se průměrně pohybovaly okolo 252 MPa, meze pevnosti v tahu R_m 512 MPa. Pro materiál CF-3M (316L) ve stavu žíhaném jsou udávané charakteristiky mechanických vlastností při $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{p0,2} = \text{min. } 205 \text{ MPa}$, $R_m = \text{min. } 485 \text{ MPa}$, $A = \text{min. } 30 \text{ } \%$.

Závěr

Hodnocení poškození oběžného kola s průchozí trhlinou na jedné z lopatek bylo rozděleno na několik částí. Cílem hodnocení bylo určit kořenovou příčinu poškození oběžného kola čerpadla a doporučit opatření pro další provoz komponenty. Prvotní nedestruktivní hodnocení bylo

doplněno hodnocením destruktivním a tenzometrickým měření vnitřního pnutí lopatek. Nede­struktivní hodnocení bylo zaměřeno na vizuální kontrolu kola, kapilární hodnocení nepoškoze­ných lopatek a zjištění chemického složení. Destruktivní hodnocení sestávalo z fraktografic­kých a metalografických analýz a ze stanovení mechanických vlastností v tahu.

Vizuální kontrola potvrdila přítomnost průchozí trhliny na lopatce č. 1. Trhlina se šířila z ná­běhové hrany lopatky v oblasti rádiusu do délky cca 110 mm, kde došlo k jejímu větvení. Pří­tomnost další trhliny v totožném místě byla zjištěna kapilární zkouškou na lopatce č. 2. Zbylé lopatky byly bez indikací.

Měření vnitřního pnutí bylo rozděleno do dvou etap. V první etapě bylo sledováno sevření trhliny pomocí hydraulického stroje v závislosti na síle, na řezu lopatky č. 1. Ve druhé etapě byla pak zjišťována šířka rozevírání při řezání lopatky č. 4 na jednom řezu jejím středem a v kontrolním řezu vzdáleném 28 mm od náběžné hrany. Tlakovým testem bylo zjištěno, že k uzavření trhliny dochází již na počátku zatěžování a hodnoty tahového předpětí se se vznikem trhliny snížily v místě lopatky č. 1 nanejvýše o 5 MPa. Naproti tomu uvolněním zbytkového napětí rozříznutím lopatky č. 4 byla prokázána poměrně vysoká úroveň zbytkového napětí až 101 MPa.

Chemické složení materiálu oběžného kola bylo ověřeno (změřeno) metodou OES. Na zá­kladě série 10 měření bylo zjištěno, že chemickým složením materiál odpovídá materiálu CF-3M (316L) s nízkým obsahem uhlíku.

Fraktografie lomových ploch prokázala u obou trhlín (lopatka č. 1 a č. 2) únavové poškození materiálu doprovázené výskytem striací na lomové ploše. Mikroskopická charakteristika lomu odpovídala projevům korozního únavového šíření vady. Na lomových plochách byly v četném zastoupení patrné vady materiálu (dutiny, resp. řediny), které souvisí s fází tuhnutí odlitku. Maximální hloubka poškození (dutin) v místech iniciace byla cca 200 μm . V mikrostrukturu materiálu se vyskytovaly oxidické a karbidické vměstky, které byly vyloučeny převážně na hranicích δ -feritu. Obsah δ -feritu se v materiálu vyskytoval okolo necelých 15 %. Zrna v příč­ném řezu měla kolumnární tvar a jejich velikost se pohybovala v řádu jednotek milimetrů.

Stanovení základních mechanických vlastností bylo provedeno na 5 ZT statickou zkouškou v tahu dle ČSN EN ISO 6892-1. Z výsledků je patrné, že všechny sledované parametry, smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m a tažnost A bezpečně přesahovaly minimální hod­noty udávané v materiálových listech pro materiál CF-3M.

Literatura

- [1] Cencinger, F. (2009): *Primární část JE VVER 1000, díl III. Pomocné systémy primárního okruhu*. Školící středisko ČEZ, Brno.
- [2] Hoffmann, K. (1989): *An Introduction to Measurement Using Strain Gages*. Hottinger Baldwin Messtechnik.
- [3] ASTM (1981): *Standard ASTM E837, Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. Standard, ASTM E837, ASTM International, West Conshohocken (PA).
- [4] Birger, I. A. (1963): *Ostatočnye naprjaženia*. Mašgiz, Moskva.
- [5] Otáhal, V. (2015): *Vady odlitků. Atlas vad. Železné a neželezné slitiny*. MetalCasting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav, Brno.
- [6] ASTM (2002): *Standard ASTM A744, Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for Severe Service*. Standard, ASTM A744, ASTM International, West Conshohocken (PA).