

ROZBOR KOROZNÍHO NAPADENÍ LOPAT KAPLANOVY TURBÍNY MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

THE ANALYSIS OF CORROSION ATTACK OF BLADES OF SMALL WATER POWER STATION

Josef Kasl^{a)}, Jakub Horník^{b)}, Jana Pecharová^{a)}, Miroslava Matějová^{a)}, Stanislav Krum^{b)} a Petr Zuna^{b)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

^{b)} ČVUT v Praze, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2

Abstrakt

Príspevok obsahuje výsledky materiálového rozboru lopatek oběžného kola Kaplanovy turbíny na malé vodní elektrárně. Analyzováno bylo prvkové složení materiálu, jeho mechanické vlastnosti, mikrostruktura a morfologie povrchových korozních důlků. Dále bylo stanoveno složení úsad a korozních produktů. K povrchovému poškození všech tří lopat došlo lokální korozi za vzniku korozních důlků o velikosti až několika milimetrů. Příspěvek podává výsledky těchto rozborů a je v něm diskutován vliv původního stavu dílů na korozní napadení.

The contribution contains results of material analysis of rotating blades of Kaplan turbine of small water power station. Analyses of chemical composition, mechanical properties, and microstructure of blade material were performed. In addition composition of corrosion products was measured. Pitting corrosion of blade surface was found on all blades; the maximum size of corrosion dimples reached values of several millimetres. The key cause of corrosion attack is discussed on the basis of obtained results.

Úvod

Na malé vodní jezové elektrárně na Labi jsou provozovány dvě turbíny TG1 vyrobené v roce 2013. Výkon každé turbíny je 3582 kW, průměr oběžného kola 5,1 m. Elektrárna byla uvedena do provozu v září 2014. Při následujících inspekcích mokrých částí turbíny bylo zjištěno lokální korozní napadení lopat oběžných kol. Tyto skutečnosti vyvolaly reklamační řízení. Lopatky oběžného kola byly vyrobeny z materiálu GX4CrNi13-4 mod [1]. Modifikace prvkového složení spočívala ve změnách v obsazích prvků Cr (13,0 – 13,5 hm. %), Mo (0,6 – 0,7 hm. %) a N (0,02 – 0,03 hm. %). Tepelné zpracování odlitků bylo následující: austenitizace na teplotě 1020 °C/12h/vzduch (ochlazování 31 hod) a žihání 600 °C/12hod/pec (ochlazování 23,5 hod. rychlostí 21 °C/hod).

První analýzy byly provedeny přímo na elektrárně a spočívaly v nedestruktivní analýze buď přímo na celých lopatkách (chemické složení materiálu lopatek přenosným analyzátozem, mikrostruktura lopatek metodou, složení úsad přenosným analyzátozem) a v odběru velmi malých vzorků zpracovaných v laboratoři. Příspěvek popisuje zejména výsledky zkoušek provedených na vzorcích vyrobených z relativně velkých objemů materiálu odebraného z oběžných lopat turbín.

Cílem práce bylo a) potvrdit/nebo vyvrátit splnění předepsaných vlastností materiálu deklarovaných výrobcem; b) stanovení mechanismu korozního napadení.

Sledované vzorky a použité metody

Na elektrárně byl proveden odběr celkem čtyř vzorků ze všech tří lopat turbíny č. 2. Vzorky byly odvrtny při intenzivním chlazením ostříkovaním (doba odvrátání činila 20 – 30 minut). Takto odebrané vzorky byly válcovitého tvaru o průměru cca 14 mm a rozdílné délce v závislosti na poloze (různá tloušťka stěny a orientace povrchů). Po dokumentaci

vzorků byly vzorky prohlédnuty pomocí stereolupy (SL) a řádkovacího elektronového mikroskopu (ŘEM). Pozornost byla zaměřena na stranu vzorku, která pocházela ze strany Pressure side (PS) lopaty. Na této straně byly totiž cíleně vybírány oblasti korozního poškození. Na povrchu byl dokumentován vzhled korozních produktů a úsad a bylo stanoveno jejich prvkové složení pomocí metody ED mikroanalýzy. Pozornost byla rovněž věnována korozním důlkům. Následně byly korozní zplodiny umyty a znovu sledovány pomocí SL a ŘEM. Jeden ze vzorků byl použit na stanovení mechanických parametrů materiálu turbíny. Z důvodu omezeného množství odebraného materiálu nebylo možné vyrobit zkušební tělesa standardní velikosti, a byla proto vyrobena dvě miniaturní zkušební tělesa o průměru dřívku 2 mm a celkové délce 20 mm. Zbývající tři zkušební tělesa pak byla podélně rozříznuta. Rovina řezu byla orientována tak, že byla „rovnoběžná“ s podélnou osou turbíny a leží v tangenciálním směru. Jedna sada „polovin“ vzorků byla použita pro stanovení prvkového složení metodou optické emisní spektrometrie (OES). U každého vzorku byla provedena tři měření, a to na straně PS, uprostřed vzorku a na straně suction side (SS). U druhé sady „polovin“ vzorků byly na řezech zhotoveny metalografické výbrusy. Ty byly použity ke sledování mikrostruktury materiálu pomocí BL a světelného mikroskopu (SM). Na výbrusech byla rovněž měřena mikrotvrdość HV0,5.

Výsledky

Prvkové složení materiálu

Složení bylo stanovováno postupně mobilním spektrometrem DELTA CLASSIC, metodou PMI a metodami ED a WD mikroanalýzy na velmi malém vzorku odebraném z lopatky [2] a metodou OES [3]. Omezíme-li se na obsahy pouze Cr a Mo, byly získané výsledky pro „malé“ vzorky a on line měření následující (vše udáno v hm. %):

DELTA CLASSIC	Cr – 13,2	Mo – 0,5
PMI	Cr – 12,2 až 13,6	Mo – 0,46 – 0,53
ED mikroanalýza	Cr – 13,4	Mo – 0,5
WD mikroanalýza	Cr – 12,9	Mo – 0,83

Rozbor pomocí OES byl proveden vždy na třech místech na vzorku reprezentujícím celou tloušťku stěny lopatky – při obou stěnách a „uprostřed“ tloušťky stěny lopatky. Analýza je integrální v tom smyslu, že výsledek je získán z „plochy“ asi 10 mm². Výsledky analýzy ukazují, že složení vzorků se v tloušťce všech tří lopat prakticky nemění a u lopat č. 1 a č. 3 je prakticky totožné. U vzorku z lopaty č. 2 byl ve srovnání se zbývajícími lopatami zjištěn vyšší obsah C, Mn, P, S, Cu a Ni a naopak nižší obsah Mo. Prvkové složení všech tří analyzovaných vzorků odpovídá hodnotám uvedeným v materiálovém předpisu pro ocel G-X4CrNi13-4 (1.4317). Pokud provedeme srovnání s hodnotami deklarovanými dodavatelem pro modifikovaný materiál, lopata č. 2 nespĺňuje předepsanou dolní hranici pro obsah Mo (změřený obsah 0,48 – 0,50 hm. %, předepsaný obsah min. 0,60 hm. %).

Mechanické vlastnosti materiálu

Mechanické vlastnosti byly měřeny (z důvodu velikosti odebraného vzorku) na dvou miniaturních zkušebních tělesech (vyrobených z materiálu z lopaty 3) tahovou zkouškou při pokojové teplotě. Zjištěná mez kluzu (652, 677 MPa), mez pevnosti (804, 809 MPa) a tažnost (16,1; 16,6 %) vyhovují u obou vzorků předepsaným hodnotám (min 550 MPa; min 760 MPa; min 15 %). Tažnost je však těsně nad povoleným limitem. Při zkoušce došlo k lomu těles transkrystalickým tvárným porušením, tedy očekávaným mechanismem. Překvapující poněkud bylo to, že ačkoliv jedna lomová plocha přecházela přes část řediny, ve výsledcích mechanických parametrů se to však výrazněji neprojevílo.

Mikrotvrdości měřené přes šířku stěny lopatky byly u všech tří lopatek obdobné na úrovni 280 HV 0,5 (odpovídá hodnotám tvrdości 27 HRC resp. 266 HB) a nebyly ani zjištěny žádné

výrazné změny v jejich průběhu přes šířku stěny. Tvrdost není v předpisech výrobce ani v normě specifikována.

Struktura materiálu

Ve struktuře materiálu se v celém objemu vyskytují drobné řediny a jejich shluky, což je ovšem v litém materiálu očekávatelné. Jednotlivé řediny dosahují velikosti až několika desetin milimetru. V materiálu bylo také přítomno relativně velké množství oxidických globulárních vměstků s typickou velikostí několika desítek, výjimečně až stovek mikrometrů.

Mikrostruktura materiálu je tvořena směsí martenzitu a δ -feritu. Částice δ -feritu mají (na řezu) většinou výrazně protáhlý tvar, často orientovaný směrem ke stěnám lopaty. V trojrozměrném pohledu se jedná jak o částice stěžňovitěhu, tak i deskovitěhu dosti členitého tvaru. Tato mikrostruktura je očekávaná vzhledem k chemické konstituci materiálu a její poloze v Schäfflerově diagramu. Množství δ -feritu (stanovované na řezech) bylo u jednotlivých lopatek 1,3 (lopata 2), 1,8 (lopata 3) a 2,0 (lopata 1) procent plošného podílu. ED mikroanalýza ukázala, že existují výrazné rozdíly v obsazích chrómu a molybdenu v martenzitické matici a v částicích δ -feritu. Změřený obsah chrómu v matici byl na úrovni 13 hm. %, zatímco v δ -feritu činil 17 hm. %. U molybdenu bylo obohacení částic δ -feritu ještě výraznější na úrovni 100 % - 0,7 hm. % v matici a 1,5 hm. % v částicích δ -feritu.

Korozní napadení

U všech tří vzorků bylo na straně PS pozorováno selektivní korozní napadení, které se projevovalo přítomností korozních izolovaných důlků a jejich skupin v různé fázi vývoje. Na straně SS korozní důlky nebyly přítomny, neboť zatímco na straně PS byly cíleně zaměřeny, na straně SS nebyly z tohoto pohledu náhodným výběrem „zasazeny“.

Charakter všech důlků na všech třech sledovaných vzorcích je obdobný. Důlky vznikly, nebo se případně rozvíjely z původních defektů, selektivním korozním napadením. Tomu výrazněji odolávaly částice δ -feritu díky svému zvýšenému obsahu chrómu a molybdenu. V korozních důlcích tak tyto částice vytvářejí výběžky do „volného“ prostoru, které často vytvářejí bizarní útvary a propletence. Povrchová struktura zkorodované martenzitické matrice (pokud není překryta korozními produkty) odráží mikrostrukturu této strukturní složky. Korozní napadení napadá hranice martenzitických jehlic/paketů a často jsou tím uvolněny částice kovu, které se mohou zachytit společně s korozními zplodinami a úsadami v povrchových krustách a objemnějších výplních korozních důlků.

Korozní napadení je na povrchu v různém stupni vývoje – převažující část povrchu je bez zjevné koroze, jsou přítomné nehluboké mělké jamky, ale i složitější systémy důlků a kanálků o rozměrech (laterálních i hloubkových) přesahujících 1 mm.

Selektivní napadení nerezavějících martenzitických ocelí je vyvoláno lokálním narušením povrchové pasivační vrstvy. Vedle vlastností materiálu a okolního (korozního prostředí) je významným faktorem případného korozního procesu stav povrchové vrstvy. V optimálním stavu by měl být povrch co nejhladší (vyleštěný). U sledovaných vzorků se povrch jevil jako dosti narušený brusnými rýhami (odhlédneme-li od hrubých škrábanců, které zřejmě vznikly při odběru vzorků).

V materiálu všech tří lopat byly nalézány necelistvosti metalurgického původu – póry a řediny. Uvážíme-li jejich množství, které bylo nalezeno při rozborech (v malém objemu materiálu dodaných vzorků ve srovnání s celkovým objemem lopat), je vysoce pravděpodobné, že některé ústily na opracovaný povrch lopat. Tyto povrchové defekty byly iniciátory rozvoje korozních důlků tím, že vytvářely polouzavřené prostředí, ve kterém postupně narůstala koncentrace škodlivých látek vyvolávajících korozi. Vliv chemické heterogenity na hranicích mezi martenzitem a částicemi δ -feritu (v místech, kde toto rozhraní ústí na povrch lopaty) je nejasné.

V korozních produktech a úsadách převládají oxidy železa a chromu. Množství vápníku je menší (v průměru 2,7 hm. %), množství manganu výrazně kolísá - od 0 do 15,6 hm. %. Hmota obsahuje v menším množství sodík, hořčík, hliník, křemík, fosfor, síra, chlór, draslík a titan. Ojedinele detekovány i kobalt a měď.

Závěry

Vlastnosti materiálu lopat

a) Chemické složení lopaty č. 2 nesplňuje předepsanou dolní hranici pro obsah Mo (změřený obsah 0,48 – 0,50 hm. %, předepsaný obsah min. 0,60 hm. %) deklarovanou výrobcem pro modifikovanou ocel G-X4CrNi13-4 (1.4317).

b) Mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti a tažnost) vyhovují předpisu. Zjištěná tažnost je však těsně nad povoleným limitem.

c) Struktura materiálu. Materiál ve sledovaném objemu obsahuje izolované řediny i jejich shluky o velikosti od několika desetin do jednoho milimetru. Z hlediska mikročistoty materiál obsahuje relativně velký počet globulitických vměstků o velikosti do několika desetin milimetru. Mikrostruktura materiálu je (podle očekávání) tvořena směsí martenzitu a δ -feritu (od 1,3 do 2,0 objemových procent). Jeho částice byly oproti martenzitické matici výrazně obohaceny o chrom (o 30 %) a molybden (o 114 %).

Korozní napadení povrchu lopat

Korozní degradace materiálu je vždy dána spolupůsobením nejméně tří faktorů: vlastnostmi okolního korozi vyvolávajícího prostředí – v této práci není sledováno, objemovými vlastnostmi materiálu příslušného dílu (chemické a fázové složení, reálná struktura, mikročistota, mikrostruktura atd.) a stavem povrchu dílu. Z hlediska korozního napadení sledovaných lopat je možné z materiálového hlediska konstatovat:

d) U všech tří vzorků bylo na straně PS pozorováno selektivní korozní napadení. Korozní napadení je na přítomno na povrchu v různém stupni vývoje – převažující část povrchu je bez zjevné koroze; místně jsou však přítomné jamky, ale i složitější systémy důlků a kanálků o rozměrech (laterálních i hloubkových) přesahujících 1 mm.

f) Na základě rozborů odebraných vzorků lze důvodně předpokládat, že jedním z klíčových materiálových faktorů byla přítomnost dutin metalurgického původu – pórů a ředin na povrchu obrobené lopaty. Tyto povrchové defekty byly iniciátory rozvoje korozních důlků tím, že vytvářely polouzavřené prostředí, ve kterém postupně narůstala koncentrace škodlivých látek vyvolávajících korozi.

g) Dalšími negativními faktory, které mohly přispět k iniciaci a rozvoji koroze povrchu lopat, jsou mikro-heterogenita v prvkovém složení (obsahy pro korozi rozhodujících prvků chrom a molybden) jednotlivých strukturních složek a fází (martenzit a δ -ferit) a stav povrchu lopat po přebroušení.

Literatura

- [1] Standard DIN EN 10283:1998 *Corrosion resistant steel castings*. Standard DIN EN 10283:1998 Corrosion resistant steel castings.
- [2] Horník, J., Krum, S.: *Analýza korozního poškození turbínových lopatek MVE Štětí*, technická zpráva 16-10-091, FS ČVUT Praha, 12.10.2016.
- [3] Kasl, J., Pecharová, J., Novák, M., Matějová, M.: *Materiálový rozbor vzorků z korozně poškozených oběžných lopatek Kaplanovy turbíny 2 z el. MVE Štětí*. Výzkumná zpráva VYZ-VZ/58/017/032, VZÚ Plzeň, Plzeň 15.06.2017.