

KOROZNĚ ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI OCELI COR 13/4 PRO KOMPONENTY VODNÍCH TURBÍN

CORROSION FATIGUE PROPERTIES OF STEEL COR 13/4 FOR WATER TURBINE COMPONENTS

Josef Strejcius, Zbyněk Špirit, Zdeněk Fulín a Michal Chocholoušek

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Príspevek prezentuje materiálové zkoušky pro stanovení podmínek iniciace korozně-únavových trhlin v oceli COR 13/4. V příspěvku jsou shrnuty výsledky zkoušek vysokocyklové únavy oceli COR 13/4 – stanovení S-N křivek na hladkých a vrubovaných válcových tyčích při asymetrii cyklu $R=0, -1$ a středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa, na vzduchu a v proudící vodě s obsahem chloridu sodného 500 mg/l, při teplotě 15 °C, při rovnovážném obsahu rozpuštěného kyslíku, kontrolovaném pH, s měřením elektrochemického elektrodového potenciálu a proudového šumu. Experimentální práce byly provedeny v rámci projektu podpořeného TAČR NCE/DP2S1 – Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků.

Abstract

The paper presents material tests for determining the conditions of corrosion-fatigue crack initiation in COR 13/4 steel. The paper summarizes the results of high-cyclic fatigue tests of COR 13/4 steel – determination of S-N curves on smooth and notched cylindrical rods at cycle asymmetry $R = 0, -1$ and mean prestress $\sigma_m = 330$ MPa, in air and in flowing water containing sodium chloride with concentration 500 mg/l, at 15 °C, at equilibrium dissolved oxygen content, pH controlled, with measurement of electrochemical electrode potential and current noise. Experimental work was performed within a project supported by TAČR NCE/DP2S1 – Development of diagnostic methods for characterization of key components of power units.

Úvod

Pro spolehlivý odhad zbytkové životnosti hydraulických turbín je důležité porozumět jejich chování při iniciaci a šíření únavových trhlin, jakožto převažujícího degradačního mechanismu [1], [2]. Z důvodu dobré odolnosti vůči korozi a kavitační erozi, ale hlavně proto, že jsou relativně snadno odlévatelné a svařitelné, se v současné době používají k výrobě komponent vodních turbín měkké martenzitické oceli obsahující 13 % Cr a 4 % Ni. Při hodnocení únavy oběžných kol vodních turbín je nezbytné vzít v úvahu následující faktory: konstrukci kola, materiál, proces odlévání, který neodmyslitelně vytváří vady, jako jsou licí dutiny a svařovací proces, který indukuje významná zbytková napětí a vytváří teplem ovlivněnou zónu v blízkosti linie ztavení se základním materiálem. Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. spolupracuje s VUT v Brně a provozovatelem turbín ČEZ, a. s. na vývoji metodiky pro kvalifikovaný odhad rizika únavového poškození oběžných kol z martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli GX4CrNi13-4+QT1 (COR 13/4). Za tímto účelem bylo potřebné v první fázi definovat podmínky, za kterých dochází k iniciaci trhlin a následně stanovit rychlosti jejich šíření v závislosti na působících mechanických silách. V aktuálním příspěvku jsou shrnuty výsledky zkoušek vysokocyklové únavy oceli COR 13/4 – stanovení S-N křivek na hladkých a vrubovaných válcových tyčích při různé asymetrii cyklu na vzduchu a v proudící vodě. Práce navazuje na text publikovaný v roce 2019 [3], kde je popsána použitá metodika zkoušek vysokocyklové únavy ve vodním prostředí. Protože tyto 13% Cr-4% Ni martenzitické nerezové oceli obsahují reformovaný austenit (až 25 % v závislosti na typu slitiny a tepelném zpracování) [4] a tento austenit

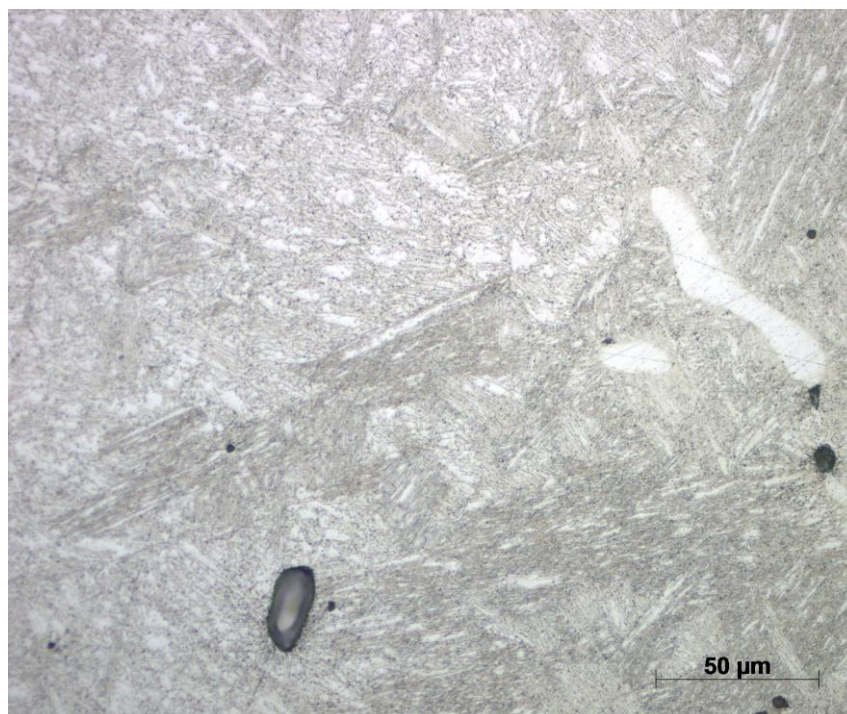
může ovlivňovat chování slitin při šíření únavových trhlin a při opakovaných opravách svařováním, je část příspěvku věnována metalografické analýze použitého experimentálního materiálu.

Experimentální materiál

Studovaný materiál je martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN) – COR 13/4 v zušlechtném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu), od výrobce Litostroj Engineering, a.s. Materiál byl dodán ve formě přilíhých zkušebních bloků o rozměrech 100 x 110 x 250 mm a 100 x 110 x 350 mm z výroby rozváděcích lopatek z taveb 1860, 1722, 34812/2 a 34818/3. Tepelné zpracování bylo provedeno režimem kalení 1050±15 °C/15 h/vzduch//popuštění 610±10 °C/18 h/vzduch// žíhání 580±10 °C/pec.

Při pokojové teplotě obsahuje kalená ocel lathkový martenzit, ale může také obsahovat malé množství δ -feritu. Rychlost ochlazování při kalení nehraje důležitou roli, takže i silné sekce mohou být chlazeny vzduchem a stále jsou plně martenzitické. COR 13/4 se obvykle používá v popuštěném stavu. Během temperování mezi 565 °C a 620 °C se část martenzitu přemění zpět na austenit. Tento austenit se obohacuje niklem a je tedy stabilní, i když se slitina ochladí zpět na pokojovou teplotu. V závislosti na době temperování, teplotě a přesném chemickém složení slitiny lze po temperování ve struktuře najít až 25 % reformovaného austenitu. Tento reformovaný austenit roste difuzním procesem. Je jemně rozptýlen v martenzitické matici a nelze jej rozlišit optickou mikroskopií; může být pozorován v elektronovém rastrovacím mikroskopu [5].

Na obr. 1 je struktura oceli COR 13/4 v dodaném stavu po naleptání pozorovaná v optickém mikroskopu. Materiál je izotropní, struktura je tvořena popuštěným lathkovým martenzitem s malým množstvím δ feritu. Ve struktuře jsou oxidické městky. Na lomových plochách jsou často nalézány relativně velké lící vady ve formě kavit.

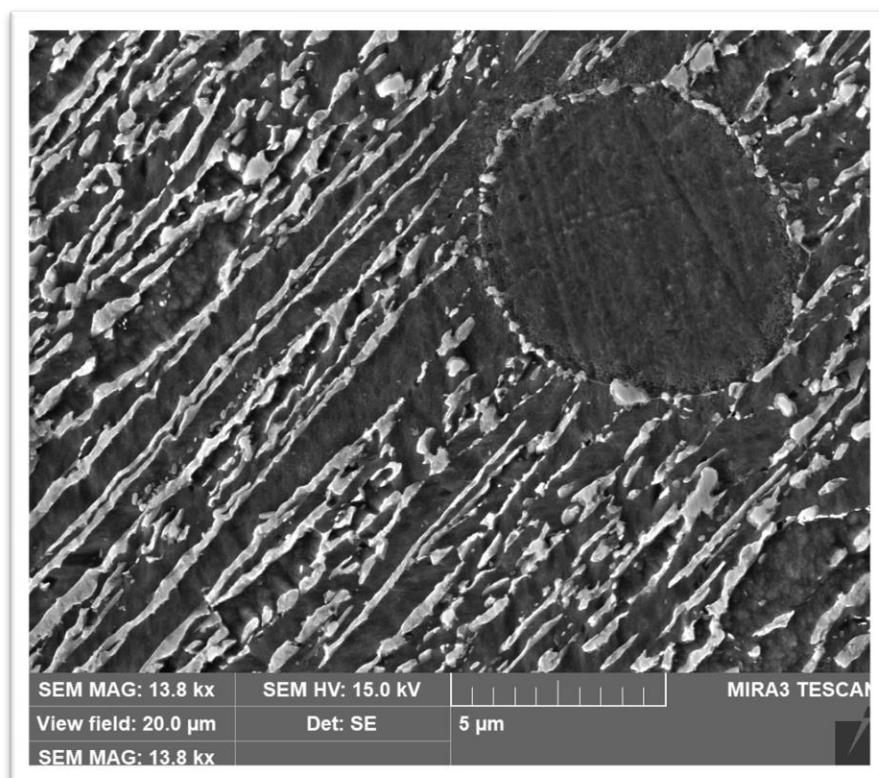


Obr. 1: Mikrostruktura oceli COR13/4 v optickém mikroskopu

Metalografické výbrusy pro pozorování struktury při velkém rozlišení v elektronovém mikroskopu byly naleptány v činidle Adler po dobu 10 sekund. Snímky naleptaných výbrusů byly

pořízeny v režimu sekundárních elektronů na rastrovacím elektronovém mikroskopu MIRA 3GMU od firmy TESCAN.

Na obr. 2 je viditelná 3fázová mikrostruktura tvořená primárně popuštěným martenzitem (černá část mezi bílými lamelami austenitu), delta ferit (černá kruhová) a bílé jehlice – austenit. Na základě EDS analýzy byl prokázán zvýšený obsah Ni u austenitické fáze v porovnání s matricí.

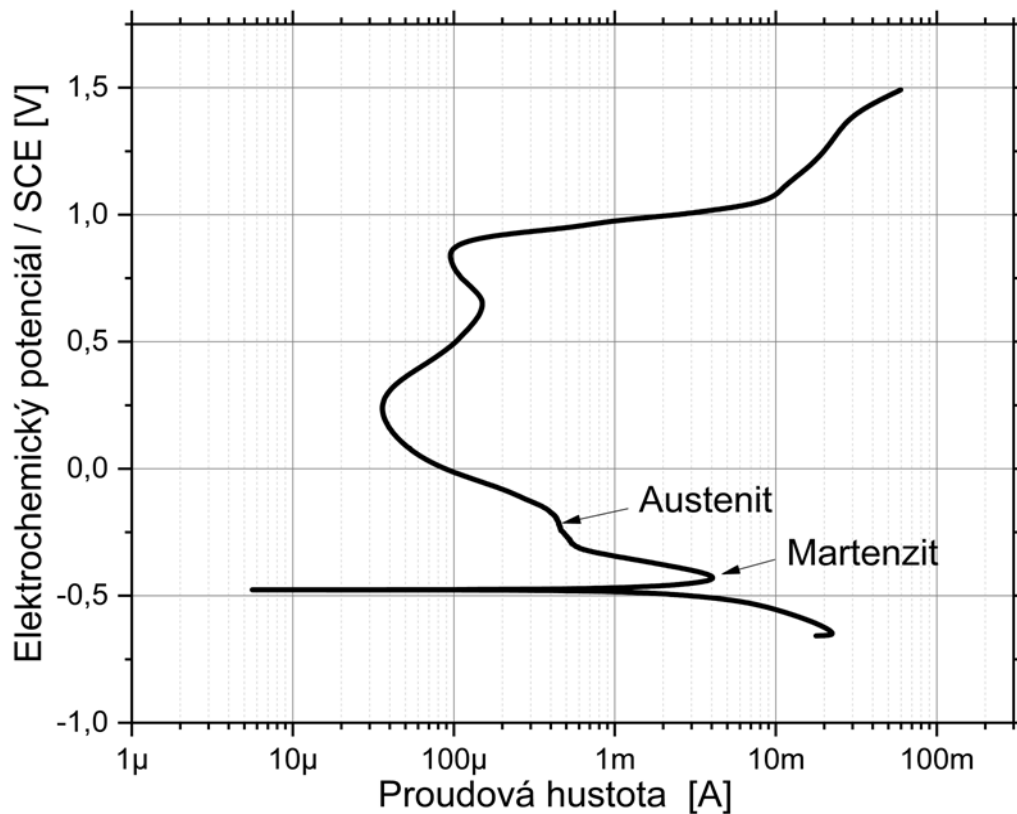


Obr. 2: Mikrostruktura oceli COR13/4 v elektronovém mikroskopu

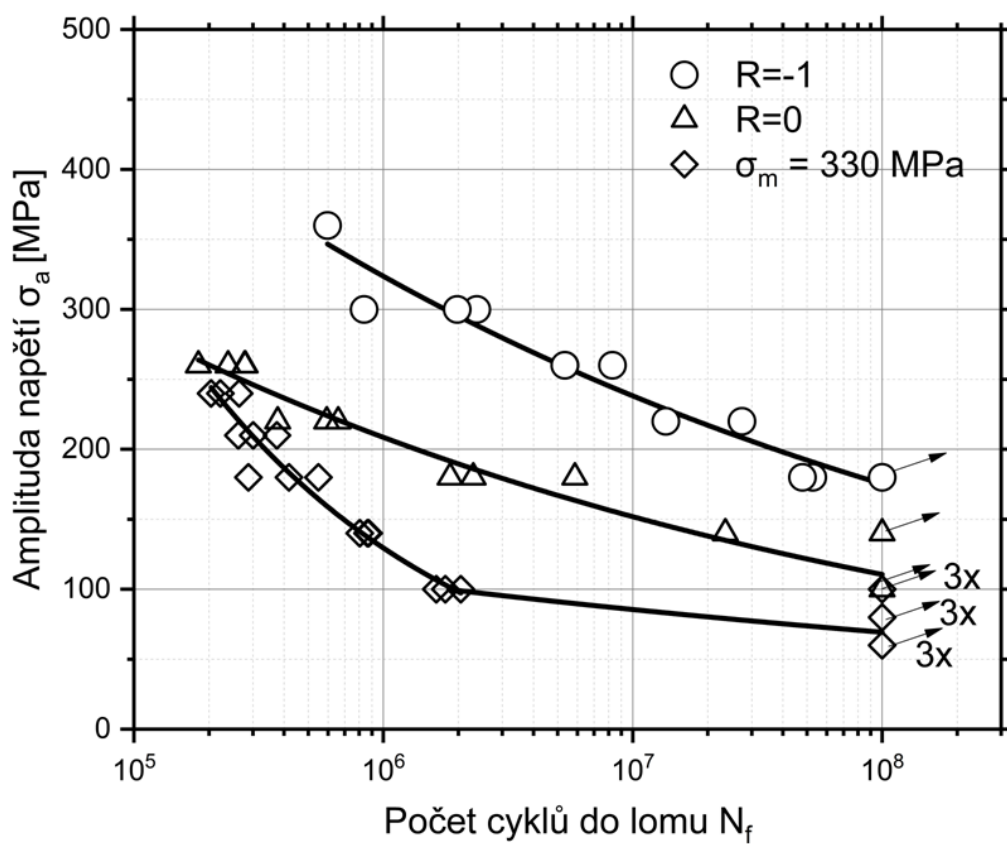
Vyhodnocením difrakčních záznamů byl z amplitudy Braggových píků pro austenit a ferit odhadnut obsah austenitu v studované oceli 19,4 %. Na základě předběžných testů se zdá, že přítomnost austenitu ve struktuře by bylo možno též detekovat z průběhu elektrochemických polarizačních křivek, z velikosti sekundárního proudového píku v oblasti aktivity viz obr. 3. (polarizační křivka v elektrolytu 10 % kyseliny šťavelové, 40 °C).

Zkoušky vysokocyklové únavové pevnosti

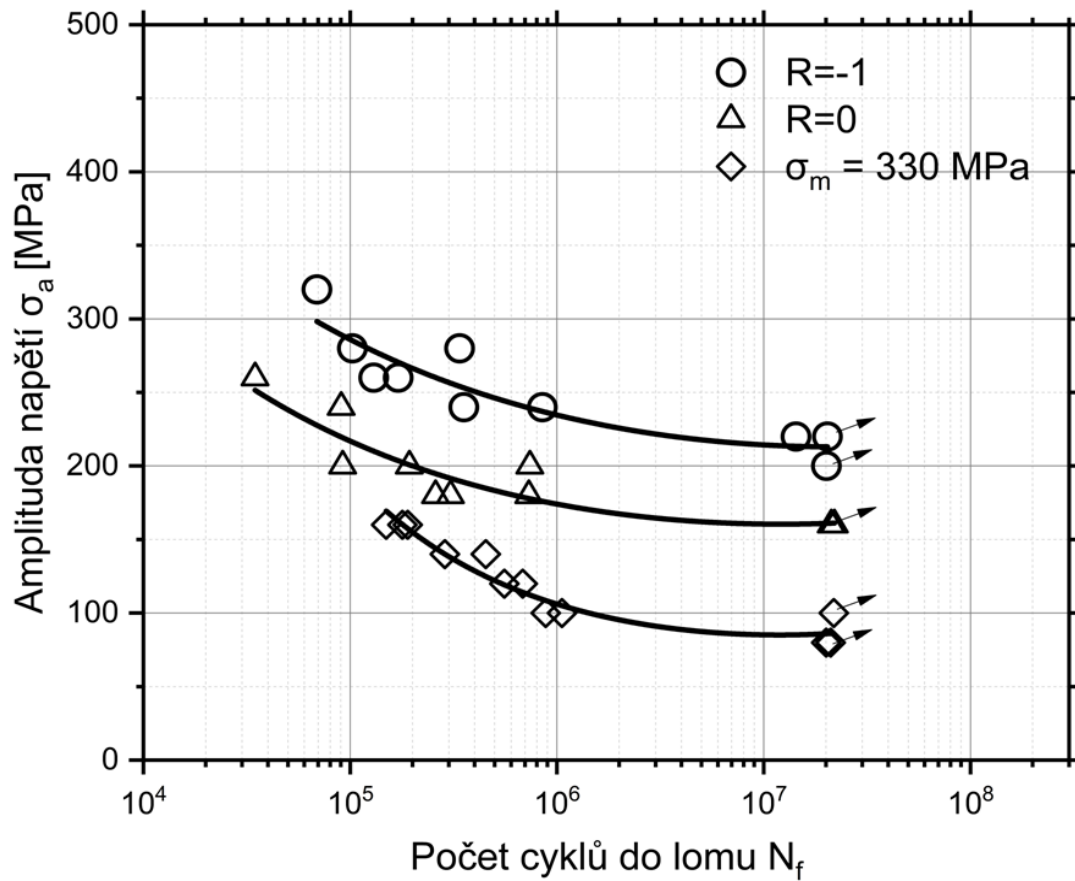
Ke dni odevzdání příspěvku do tisku byly provedeny zkoušky vysokocyklové únavy oceli GX4CrNi13-4 měřené na hladkých a vrubovaných vzorcích ve vodě s přidavkem chloridu sodného, temperované na 15 °C, při střídavém, míjivém a pulzujícím namáhání s předpětím $\sigma_m = 330$ MPa v tahu/tlaku při frekvenci 123 Hz a obdobné testy na vzduchu na vrubovaných tělesech. V současné době dobíhají testy na hladkých tělesech na vzduchu. Naměřená data jsou v grafech na obr. 4 až obr. 6.



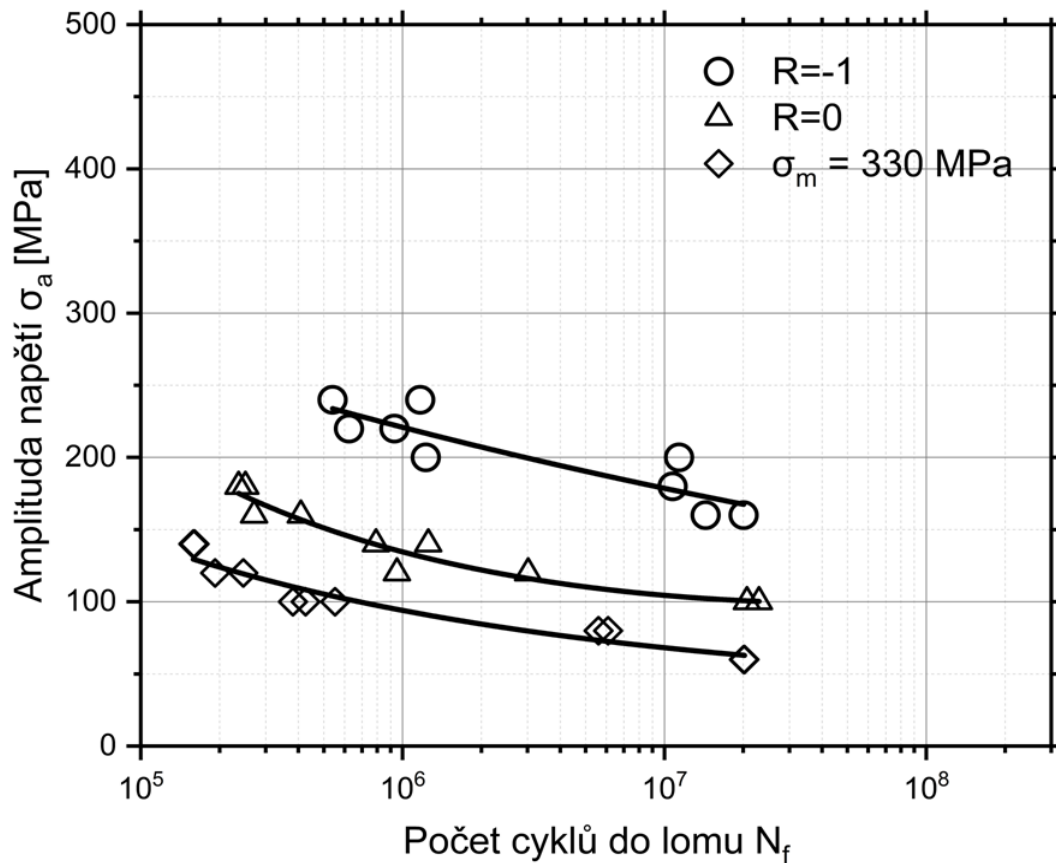
Obr. 3: Potenciokinetic polarizační křivka oceli COR13/4 v dodaném stavu



Obr. 4: Wöhlerovy křivky oceli COR13/4 ve vodě /hladké vzorky/



Obr. 5: Wöhlerovy křivky oceli COR13/4 na vzduchu /vrubované vzorky/



Obr. 6: Wöhlerovy křivky oceli COR13/4 ve vodě /vrubované vzorky/

Závěr

Ocel COR 13/4 obsahuje v popuštěném stavu reformovaný austenit. Austenit, který vzniká z martenzitu při popuštění v intervalu teplot 600 až 630 °C je stabilní i když je ocel ochlazená na pokojovou teplotu. To je dáno obohacením austenitu o nikl, který jej stabilizuje. Při vyšších popouštěcích teplotách je austenit nestabilní a při ochlazení se transformuje zpět na martenzit. Tento stav je z materiálového hlediska nežádoucí.

Na základě provedených měření vysokocyklové únavové pevnosti lze konstatovat, že únavová pevnost oceli COR 13/4 ve vodě je vždy nižší než na vzduchu, nevyšší hodnota meze únavy oceli COR13/4 byla stanovena v případě střídavého zatěžování při měření na zkušebních vzorcích s leštěným povrchem $\sigma_c = 280$ MPa, s rostoucím statickým středním předpětím tolerance k dynamickému zatěžování klesá. Časovaná mez únavy při střídavém zatěžování vzorků ve vodě je o 100 MPa nižší než na vzduchu a má stále klesající tendenci (při extrapolaci na 10^9 cyklů $\sigma_c = 130$ MPa). Při statickém předpětí $\sigma_m = 330$ MPa dochází k iniciaci a šíření trhlin ve vodě již amplitudách kolem 80 MPa, povrchové vruby a vnitřní vady opět mají za následek pokles únavové pevnosti. Při kombinaci vysokého statického předpětí a koncentrace napětí dané existencí povrchového vrubu dochází ve vodě k iniciaci trhlin při amplitudách kolem 50 MPa.

Poděkování

Předložená práce vznikla díky projektu podporovaného TA ČR č. TN01000007 v rámci Programu Národní centra kompetence – 1. VS.

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] Xin, L., Yongyao, L., Zhengwei, W. (2016): *A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, pp. 1-14.
- [2] Trudel, A., Turgeon, M., Lanctôt, I. (2017): Recent trends in the design of hydropower components subjected to cycling and fatigue; towards improved technical design specifications. *Conference: HydroVision International 2017*, International Hydropower Association, Denver (USA).
- [3] Strejcius, J., Špirit, Z., Fulín, Z., Chocholoušek, M. (2019): Korozně-únavové vlastnosti oceli 13%Cr4%Ni pro komponenty vodních turbín. *14. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 109-114. ISBN 978-80-261-0885-6
- [4] Thibault, D., Gagnon, M., Godin, S. (2015): *The effect of materials properties on the reliability of hydraulic turbine runners*. International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 8, pp. 253-262. ISSN 1882-9554
- [5] Thibault, D., Gagnon, M., Godin, S. (2014): Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014)*, IOP Publishing, Montréal (Canada), Vol. 22, paper 012019.