

KINETIKA RŮSTŮ KOROZNĚ-ÚNAVOVÝCH TRHLIN V OCELI COR 13/4 PRO OBĚŽNÁ KOLA VODNÍCH TURBÍN

KINETICS OF CORROSION-FATIGUE CRACKS GROWTH IN COR 13/4 STEEL FOR WATER TURBINE IMPELLERS

Josef Strejcius ^{a)}, Zdeněk Fulín ^{a)}, Michal Chocholoušek ^{a)} a Zbyněk Špirit ^{a, b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt

Příspěvek je sumarizací výsledků měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin v oceli COR 13/4 pro komponenty průtočných částí vodních turbín, provedených v letech 2019-2020 v rámci projektu NCK. Měření byla provedena ve vodě při frekvenci 30 Hz. Byly stanoveny závislosti rychlosti šíření únavových trhlin při asymetriích cyklu $R = 0,1$ a $R = 0,7$. Na základě provedených experimentů byly odhadnuty prahové hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK_{th} . Byla provedena fraktografická analýza lomových ploch.

Abstract

The paper is a summary of the results of measurements of the corrosion-fatigue crack propagation rate in COR 13/4 steel for the components of the flow sections of water turbines, carried out in 2019-2020 within the NCK project. The measurements were performed in water at the frequency of 30 Hz. The fatigue crack propagation rate dependencies at cycle asymmetries $R = 0.1$ and $R = 0.7$ were determined. On the basis of the conducted experiments the threshold values of the stress intensity factor ΔK_{th} were estimated. Fractographic analysis of fracture surfaces was performed.

Úvod

Ačkoli fenomén únavy ve vodní energetice není nový, v posledních desetiletích se mu věnuje značná pozornost. Důvodem tohoto rostoucího zájmu o aspekty únavy je zvýšená flexibilita provozu vodních elektráren. Snaha o vysokou flexibilitu je motivována různými důvody: deregulací energetických trhů, která podporuje dynamičtější provoz bloků, potřebou vyvažování sítí s rostoucí integrací intermitentních obnovitelných zdrojů a v menší, ale potenciálně rostoucí míře změnou klimatu, která zvyšuje variabilitu dostupnosti vody. Protipólem zvýšené flexibility provozu je větší zatížení součástí vodních elektráren únavou, kdy časté změny provozních podmínek a trvalý provoz v podmínkách mimo dimenzování vedou k tomu, že tyto součásti jsou vystaveny většímu počtu cyklických a dynamických zatížení. Kromě toho vysoká konkurenceschopnost mezi výrobcí turbín a generátorů často vede ke konstrukcím vysoce optimalizovaných na účinnost, což může vést ke zmenšování mechanických bezpečnostních rezerv.

Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. se v letech 2019 až 2020 podílela na vývoji metodiky pro kvalifikovaný odhad rizika únavového poškození oběžných kol z martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli GX4CrNi13-4+QT1 (COR 13/4). V projektu podpořeného TAČR NCE/DP2S1 „Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“ byly definovány podmínky, za kterých dochází k iniciaci korozně-únavových trhlin [1] a následně byly stanoveny rychlosti jejich šíření v závislosti na působících mechanických silách. V aktuálním příspěvku je popsána metodika měření rychlosti růstu korozně-únavových trhlin ve vodě na CT vzorcích, se stanovením okamžité délky trhliny na základě kontinuálního záznamu rozdílu elektrických potenciálů nad trhlinou ve vzorku protékaném konstantním proudem. Použití metodiky je demonstrováno na příkladu stanovení

závislosti rychlosti šíření únavových trhlin v oceli COR13/4 ve vodě při asymetrii cyklu $R = 0,1$.

Experimentální materiál

Studovaný materiál je martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN, COR 13/4) v zušlechtěném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu), firmou Litostroj Engineering, a.s. Materiál byl dodán ve formě přilíhých zkušebních bloků z výroby rozváděcích lopatek. Tepelné zpracování bylo provedeno režimem kalení 1050 ± 15 °C / 15 h / vzduch // popuštění 610 ± 10 °C / 18 h / vzduch // žihání 580 ± 10 °C / pec. Bylo ověřeno chemické složení materiálu a stanoveny pevnostní charakteristiky.

Tab. 1: Výsledky chemické analýzy oceli COR 13/4

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Koncentrace (% hm.)	0,038	0,338	0,801	0,033	0,004	0,282	3,826	12,435	0,434
Směrodatná odchylka	0,0046	0,0033	0,0027	0,0005	0,0004	0,0016	0,0570	0,1600	0,0013

Tab. 2: Mechanické vlastnosti oceli COR 13/4

	m_E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{30} [%]	A_{manual} [%]	Z [%]
Průměr	297	579	841	7,10	19,2	20,9	66
Směrodatná odchylka	20	14	6	0,12	0,6	1,2	1

Materiál je izotropní, struktura je tvořena popuštěným laťkovým martenzitem s malým množstvím δ feritu. Ve struktuře jsou oxidické městky. V oceli jsou licí vady ve formě kavit. Vyhodnocením difrakčních záznamů byl z amplitudy Braggových píků pro austenit a ferit odhadnut obsah reformovaného austenitu na 19,4 % hm.

Měření rychlosti šíření únavových trhlin

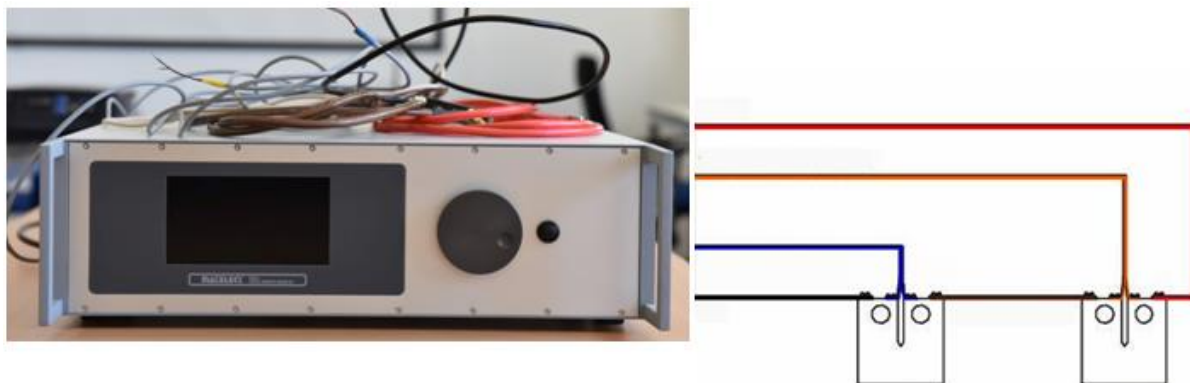
Měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve vodě byla provedena na CT tělesech na stroji Elektropuls 10 kN při konstantní zatěžovací frekvenci 30 Hz a dvou režimech řízení síly: pro měření rychlosti šíření trhliny byl použit postup držení konstantní hodnoty horní a dolní síly a pro stanovení prahové hodnoty ΔK_{th} postupné snižování maximální síly po krocích 5 % z výchozí hodnoty. Zatěžovací cyklus měl sinusový průběh.

Metodika stanovení okamžité délky trhliny únavové trhliny

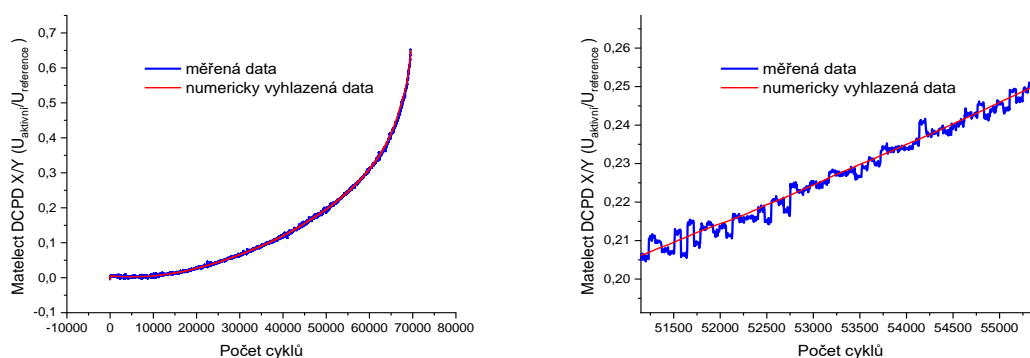
Okamžité délky únavových trhlin v CT tělesech byly měřeny na základě změny elektrického potenciálu nad trhlinou při průchodu pulzního stejnosměrného proudu technikou DCPD (Direct Current Potential Drop) s přístrojem DCM2 od firmy Matelect. Principem stejnosměrných potenciálových metod je měření napětí na povrchu vzorku protékaného elektrickým proudem a výpočet specifického odporu materiálu. Měření se nejčastěji provádí čtyřbodovou metodou, kdy dvě krajní elektrody slouží pro zavádění proudu do měřeného vzorku a prostřední slouží k měření rozdílu potenciálů na trhlince. Pro přesné stanovení délky trhliny je zapotřebí konstrukce kalibračního grafu.

V této práci byla použita modifikovaná varianta měření DCPD X/Y. V proudovém okruhu byla v sérii zapojena 2 CT tělesa, jedno aktivní mechanicky namáhané, druhé bez mechanického zatížení viz obr. 1. Tento přístup eliminuje chyby měření způsobené kombinací rozdílných materiálů vzorku a elektrických přívodů. Měření probíhalo v pulzním režimu: byl

používán proud 5 A, opakovací frekvence proudových pulzů byla cca 2 s. Pulzy nebyly synchronizovány s frekvencí zkušebního stroje.



Obr. 1: Schéma zapojení při měření délky trhliny technikou DCPD X/Y



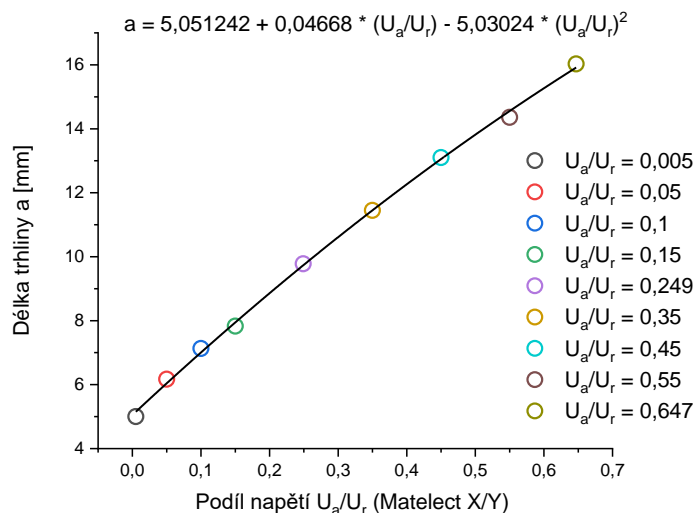
Obr. 2: Závislost poměru napětí na CT vzorcích v průběhu únavového testu

Hodnota poměru měřených napětí na CT tělesech je po zesílení a normalizaci posílána na další zpracování do elektroniky zkušebního stroje Electropuls 10000. Hodnoty jsou čteny programem WaveMetrix. Signál je mírně zašuměn, hlavní důvod je chybějící synchronizace proudových pulzů se zatěžovací frekvencí únavového stroje – napětí je stanovováno v nahodilých fázích rozevření trhliny a dále použitou frekvencí ukládání dat, která v závislost na předpokládané hodnotě rychlosti šíření trhliny a s tím spojeného množství ukládaných dat se pohybuje v intervalu 10 až 1000 cyklů. Tento šum je možné relativně dobře odstranit vhodnou numerickou filtrací dat. Příklad záznamu poměru napětí měřeného technikou DCPD X/Y během únavového testu je na obr. 2. Modrá čára odpovídá přenášeným datům z Matelectu, červená hodnotám počítaným na bázi váženého klouzavého průměru.

Pro konstrukci kalibračního grafu byly na CT tělesech nakmitány únavové trhliny různé délky pro hodnoty poměru napětí nad trhlinou aktivního a neaktivního vzorku v intervalu 0 až 0,65. Po nakmitání trhlín a po následném rozlomení vzorků byly na optickém mikroskopu určeny normované délky únavových trhlín (z podílu plochy odpovídající šíření trhliny a tloušťky zkušební tělesa). Pro zvýraznění čel trhlín byly vzorky před rozlomením krátce temperovány na teplotě 450 °C. Hodnoty normovaných délek únavových trhlín odpovídající příslušným hodnotám poměrů potenciálů byly vyneseny do grafu a body byly proloženy polynomem 2 stupně. Na základě kalibrace byl pro výpočet okamžité délky trhliny používán vztah:

$$a = 5,051242 + 0,04668 \cdot (U_a/U_r) - 5,03024 \cdot (U_a/U_r)^2, \quad (1)$$

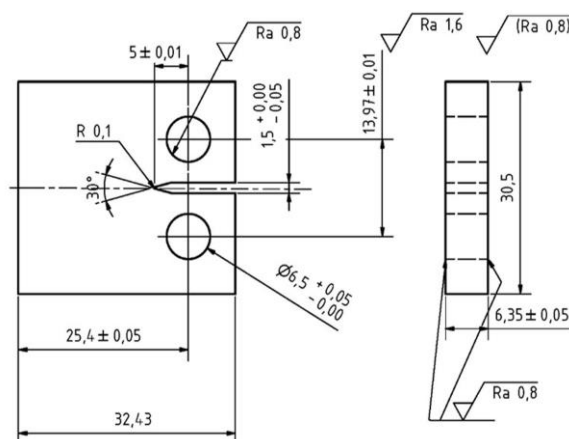
kde a je okamžitá délka trhliny včetně iniciačního vrubu měřená v mm a U_a/U_r hodnota poměru napětí nad trhlinou měřeného a srovnávacího vzorku.



Obr. 3: Kalibrační graf: závislost délky trhliny na podílu elektrického napětí na zkušebním a referenčním CT tělese

Rychlost šíření korozně-únavových trhlin při asymetrii cyklu $R = 0,1$

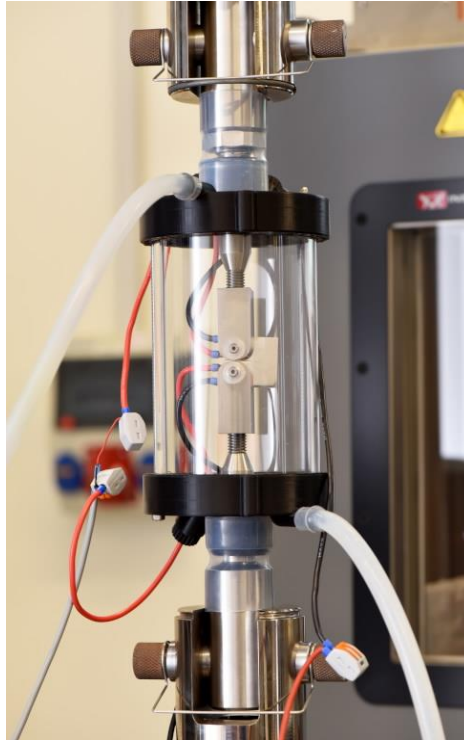
Pro stanovení rychlosti růstu korozně-únavových trhlin ve vodě a odpovídajících hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí při asymetrii cyklu $R = 0,1$ byla použita standardní 1/2" CT zkušební tělesa s redukovanou tloušťkou a iniciačním vrubem 5 mm dle výkresu na obr. 4.



Obr. 4: Zkušební tělesa pro zkoušky rychlosti šíření trhlin

Ke vzorkům byly v ploše s iniciačním vrubem přivařeny 4 elektrické přívody – Cu lanka se silikonovou izolací – dvě pro přívod elektrického proudu a dvě pro měření elektrického napětí. Upínací systém (sestava třmenů a spojovacích kolíků pro fixaci CT vzorku), který je při testu ponořen do zkušebního roztoku, byl vyroben z martenzitické nerezavějící chromové oceli T 552.

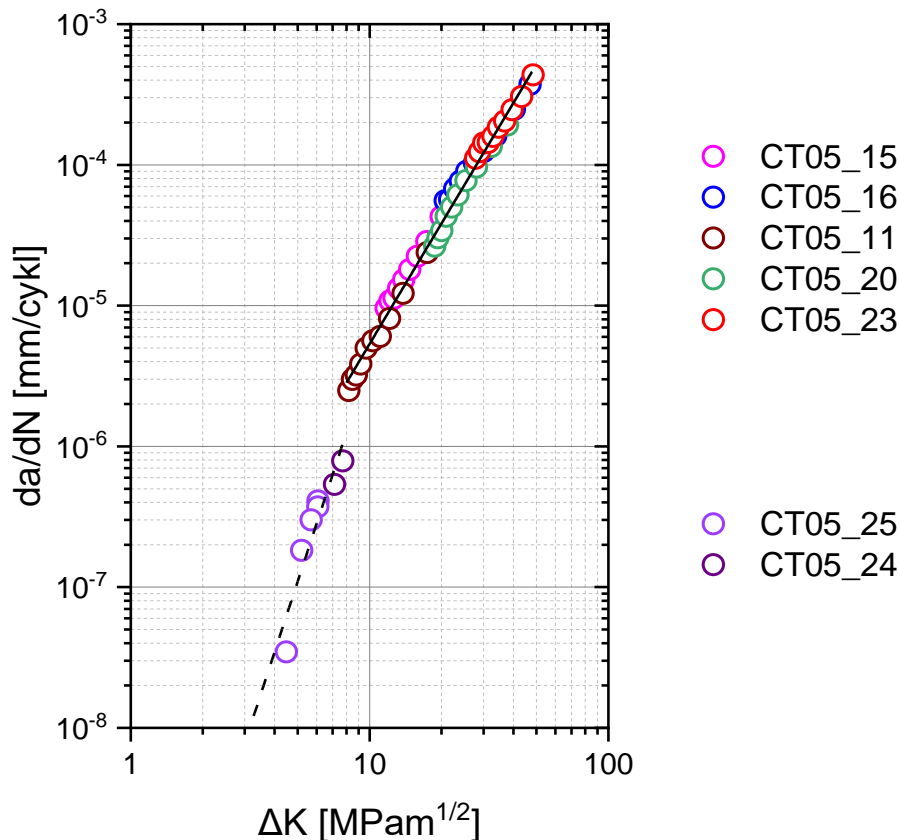
Mechanicky zatěžovaný CT vzorek při měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin byl umístěn v průtočné měřící korozní cele v pracovním prostoru zkušebního únavového stroje – viz obr. 5, referenční CT vzorek byl ponořen v zásobníku zkušebního roztoku. Zkušebním roztokem byla voda s přídatkem chloridu sodného v koncentraci 500 mg/l, chlazená na teplotu 15 ± 1 °C. Cirkulace vody mezi zkušební korozní celou a chlazeným zásobníkem byla zajištěna membránovým čerpadlem s průtokem cca 2 l/min, objem vody ve smyčce byl 5 l. Celý vodní okruh byl vyroben z korozně odolných materiálů: teflon, sklo, silikon.



Obr. 5: Zkušební cela pro zkoušky rychlosti šíření trhlin

Při stanovení rychlosti šíření korozně únavových trhlin v závislosti na rozkmitu faktoru napětí ΔK a prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_{th} bylo postupováno v souladu s doporučeními v normách ČSN ISO1782-1, ČSN ISO 12108 a ASTM Standard E 647. Pro měření rychlosti pro $da/dN > 10^{-6}$ mm/cykl byl použit postup s rostoucím ΔK – test s konstantní amplitudou síly, pro $da/dN < 10^{-6}$ mm pak metoda měření s klesajícím ΔK . Výsledky měření rychlosti šíření korozně únavové trhliny v závislosti na faktoru intenzity napětí při asymetrii cyklu $R = 0,1$ ve vodě jsou zpracovány v grafu na obr. 6. Závislost rychlosti šíření únavové trhliny ve vodě, při frekvenci zatěžování 30 Hz a asymetrii cyklu $R = 0,1$ lze v intervalu hodnot rozkmitu součinitel intenzity napětí od 10 do 50 MPam^{1/2} popsat vztahem: $da/dN = 7,66E-9 \cdot \Delta K^{2,84}$.

Prahová hodnota růstu únavové trhliny ΔK_{th} obecně odpovídá asymptotické hodnotě ΔK , pro kterou se odpovídající rychlost da/dN blíží k nule. Obvykle se definuje jako hodnota ΔK odpovídající rychlosti růstu trhliny, která se rovná rychlosti šíření 10^{-8} / cykl. Prahová hodnota faktoru intenzity napětí byla odhadnuta na základě proložení přímkou dolní desítkou údajů $\log da/dN$ versus $\log \Delta K$ - $\Delta K_{th} = 3,2$ MPam^{1/2}. Je nižší než ve zprávě ÚFM ČSAV [2].



Obr. 6: Závislost rychlosti šíření únavové trhliny na rozkmitu faktoru intenzity napětí v oceli COR 13/4 při frekvenci zatěžování 30 Hz ve vodě a asymetrii cyklu $R = 0,1$

Závěr

Potenciálová stejnosměrná metoda DCPD X/Y je použitelná pro stanovení délek trhlín v kovových materiálech exponovaných v roztocích elektricky vodivých elektrolytů.

Závislost rychlosti šíření únavové trhliny ve vodě, při frekvenci zatěžování 30 Hz a asymetrii cyklu $R = 0,1$ lze v intervalu hodnot rozkmitu součinitel intenzity napětí od 10 do 50 $\text{MPam}^{1/2}$ popsat vztahem: $da/dN = 7,66E-9 \cdot \Delta K^{2,84}$.

Na základě provedených experimentů byla odhadnuta prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí $\Delta K_{th} = 3,2 \text{ MPam}^{1/2}$.

Poděkování

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

Literatura

- [1] Strejcius, J., Špirit, Z., Fulín, Z., Chocholoušek, M. (2020): Korozně únavové vlastnosti oceli COR 13/4 pro komponenty vodních turbín. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, online, str. 119-124. ISBN 978-80-261-0959-4
- [2] Pokorný, P., Hutař, P. (2018): *Stanovení rychlosti šíření únavové trhliny v materiálu GX4CrNi13.4+QT1*. Výzkumná zpráva, Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Brno.