

KOROZNĚ ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY SVAROVÝCH SPOJŮ OCELI COR 13/4

CORROSION-FATIGUE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF COR 13/4 STEEL

Josef Strejcius, Zbyněk Špirit, David Bricín a Zdeněk Fulín

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Příspěvek shrnuje výsledky materiálových testů nutných pro definování podmínek iniciace a rychlosti šíření korozně únavových trhlin v opravných svarech lité oceli COR 13/4. Byly hodnoceny svarové spoje provedené s přídatným materiálem Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER 2209 metodami 141 a 135. Pro obě varianty svarového spoje byly stanoveny časované meze únavy ve vodě při asymetrii zátěžného cyklu $R=-1$ a středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa. Pro oba studované svarové spoje byla provedena měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněné zóně oceli COR 13/4 na kompaktních vzorcích zatěžovaných v tahu (CT) při frekvenci 30 Hz a asymetrii cyklu $R=0,1$. Byla provedena fraktografická analýza lomových ploch. Experimentální práce byly realizovány v roce 2021 v rámci projektu NCK DP6 podpořeného TA ČR.

Abstract

The paper summarizes the results of material tests necessary for defining the initiation conditions and the rate of propagation of corrosion-fatigue cracks in repair welds of cast steel COR 13/4. Welds made with the additive material Avesta 248 SV, and duplex alloy ER 2209 by welding methods 141 and 135 were evaluated. Timed fatigue limits in water were determined for both welded joint variants at load cycle asymmetry $R=-1$ and mean prestress $\sigma_m = 330$ MPa. For both welded joints studied, measurements of the corrosion-fatigue crack propagation rate in the weld metal and the heat-affected zone of COR 13/4 steel were performed on compact tensile (CT) loaded specimens at a frequency of 30 Hz and a cycle asymmetry of $R=0.1$. Fractographic analysis of the fracture surfaces was performed. The experimental work was carried out in 2021 within the framework of the NCK DP6 project supported by TA CR.

Úvod

Ačkoli fenomén únavy ve vodní energetice není nový, v posledních letech se mu věnuje značná pozornost. Důvodem tohoto rostoucího zájmu o aspekty únavy je zvýšená flexibilita provozu vodních elektráren, která 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 výrobci turbín a generátorů často vede ke konstrukcím vysoce optimalizovaných na účinnost, což může vést ke zmenšování mechanických bezpečnostních rezerv. Desetiletí provozu hydraulických turbín po celém světě prokázala nepopiratelný fakt – opravné svary průtočných částí vodních turbín jsou místem opakovaných poruch způsobených mechanismem korozně-únavového poškozování. Svarem indukovaná zbytková napětí představují dominantní faktor ovlivňující šíření únavových trhlin, což může být velký problém u opravného svařování, kdy je provedení účinného tepelného zpracování pro odstranění pnutí obtížně proveditelné.

V projektu NCK DP6 podpořeného Technologickou agenturou ČR byly v roce 2021 provedeny únavové zkoušky svarových spojů oceli COR 13/4 charakterizujících opravné svary oběžných kol vodních turbín vyrobených z této oceli a dalších zařízení průtočné části vodní turbíny jako jsou rozváděcí lopaty, dolní a horní lopátkový kruh pracujících v prostředí vody. Provedené laboratorní experimenty měly za cíl získat materiálové charakteristiky únavového poškození použitelné pro určení pravděpodobnosti iniciace korozně-únavových trhlin a dále data popisující rychlost šíření již vzniklých trhlin.

Experimentální část

Materiál

Měkké martenzitické korozivzdorné oceli s obsahem 12-13 % chromu, 2-5 % niklu a méně než 0,06 % uhlíku se používají ve vodní energetice více jak 50 let. Tyto oceli mají vysokou mez kluzu, vynikající houževnatost, přiměřenou odolnost proti kavitaci a dobrou svařitelnost. Používají se ve stavu kaleném a popuštěném. Vynikající houževnatost vzniká díky tvorbě jemně rozptýleného reformovaného austenitu v důsledku interkritického popouštění při teplotách blízkých 600 °C. Nízký obsah uhlíku pod 0,1 % hmotnosti zlepšuje svařitelnost podporou struktury s menší náchylností ke vzniku trhlin za studena, lepší odolností proti korozi a lepší houževnatostí. Svařované struktury vykazují horší chování ve srovnání se základním kovem (BM), protože proces svařování zahrnuje mnoho modifikací mikrostruktury s vytvořením tvrdších a křehčích mikrostruktur; svarový kov (WM) a tepelně ovlivněná zóna (HAZ) mají nižší odolnost proti rázu a lomovou houževnatost než základní materiál COR13/4. [1, 2, 3]

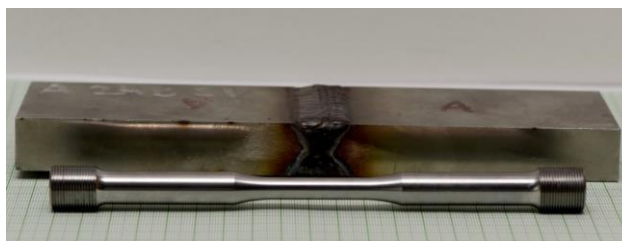
Základní materiál použitý v této práci byla martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN, COR 13/4) v zušlechťeném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu). Materiál byl dodán společností ČEZ a.s. ve formě přilítlých zkušebních bloků. Experimentální materiál byl odebrán z depozitu na elektrárně Orlik v lednu 2021. Jednalo se o několik různých taveb, rozdíly v chemickém složení bloků byly minimální, chemie odpovídala předpokládanému složení oceli COR 13/4. Materiály byly izotropní, struktura byla tvořena popuštěným laťkovým martenzitem s malým množstvím δ feritu. Ve struktuře byly oxidické vměstky. V materiálu byly licí vady ve formě kavit. Obsah reformovaného austenitu činil cca 17 % [4].

Svarové spoje oceli COR13/4

Svarové spoje byly subdodávkou společnosti ČEZ a.s. Pro svařování byly ze zkušebních bloků vyrobeny desky s tloušťkou 20 mm. Z desek byly zhotoveny ve společnosti DN PROFIWELD, s.r.o. dva typy svarového spoje oceli COR 13/4:

- s přídatným materiálem měkkou martenziticko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV metodou 141 (obloukové svařování wolframovou elektrodou),
- s přídatným materiálem duplexní slitinou ER 2209 metodou 135 (obloukové svařování s tavící elektrodou v aktivním plynu).

Bylo ověřeno chemické složení svarových spojů a provedeno hodnocení mikrostruktury /6/. Ze svařených desek byla vyrobena zkušební válcová tělesa pro zkoušky vysoko cyklické únavy, viz obr. 2.

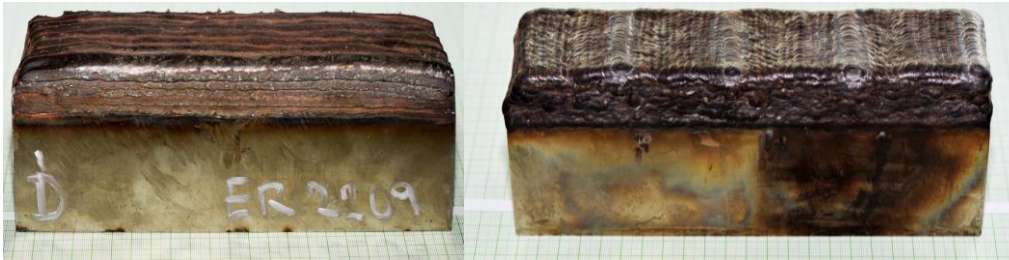


Obr. 1: Polotovár pro výrobu zkušebních těles pro zkoušky korozní únavy

Návary byly rovněž subdodávkou společnosti ČEZ a.s. Pro navařování byly ze zkušebních bloků z oceli COR 13/4 vyrobeny desky s tloušťkou 50 mm. Na deskách byly zhotoveny ve společnosti DN PROFI-WELD, s.r.o. dva typy návaru:

- s přídavným materiálem na bázi martenziticko-austenitické oceli Avesta 248 SV metodou 141 (obloukové svařování wolframovou elektrodou),
- s přídavným materiálem duplexní slitinou ER 2209 metodou 135 (obloukové svařování s tavící elektrodou v aktivním plynu).

Výška návaru byla 20 mm. Z navařených desek byly elektrojiskrovým obráběním vyrobeny zkušební vzorky pro měření rychlosti šíření únavových trhlin ve vodě.



Obr. 2: Návary duplexní oceli ER 2209 a A/M oceli Avesta 248 SV na oceli COR 13/4

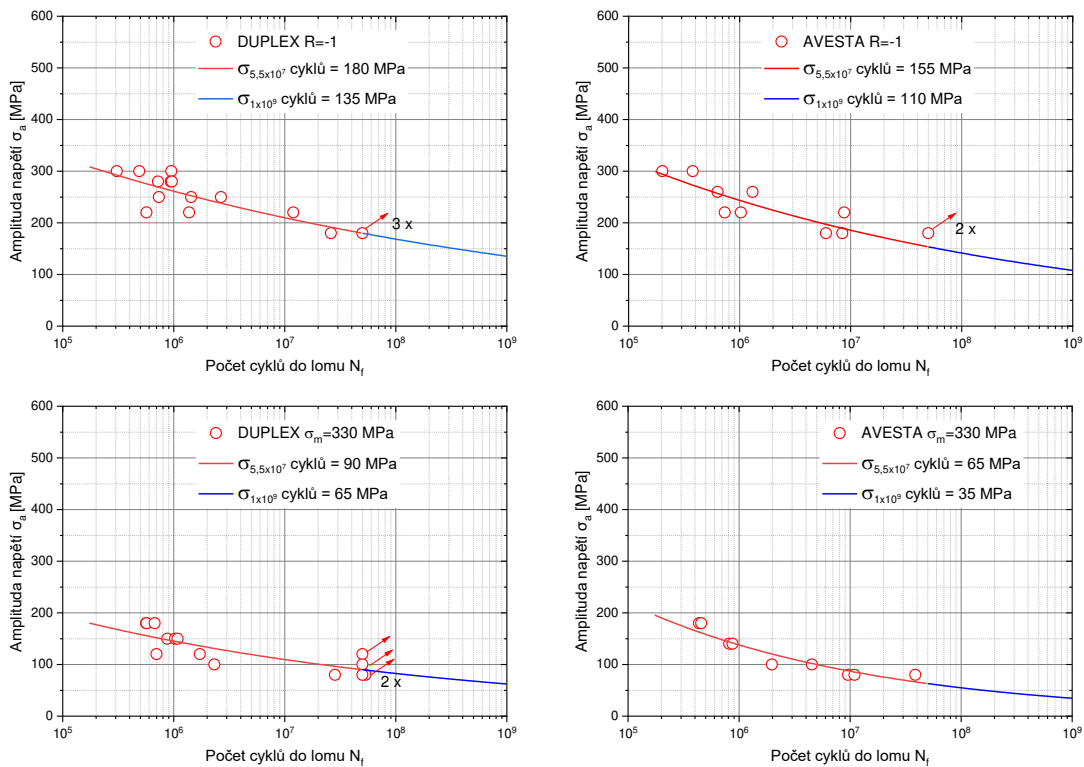
Metodiky stanovení meze časované únavové pevnosti a rychlosti šíření trhlin

Zkoušky vysokocyklové korozní únavy ve vodě byly provedeny na elektromagnetickém pulzátoru se silovou kapacitou ± 250 kN při frekvenci 123 Hz, při jednoosém zatěžování tah-tlak a při asymetrii cyklu $R=-1$ a při středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa. Byla použita válcová zkušební tělesa, svar byl situován uprostřed pracovní části zkušební tyče. Další informace k použité metodice lze nalézt v dříve publikovaném příspěvku [5].

Měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve vodě byla provedena na CT tělesech na stroji Elektropuls 10 kN při konstantní zatěžovací frekvenci 30 Hz, v režimu řízení síly. Pro měření rychlosti šíření trhliny byl použit postup držení konstantní hodnoty horní a dolní síly. Zatěžovací cyklus měl sinusový průběh. Zkušební CT tělesa byla vyrobena elektrojiskrovým obráběním z navařených desek. Pro každý návar byly připraveny dvě série zkušebních těles tak aby osa iniciačního vrubu byla rovnoběžná s rovinou ztavení základního materiálu a svarového kovu. V případě první série byl kořen iniciačního vrubu v TOO oceli COR 13/4, u druhé série vzorků byl iniciační vrub v svarovém kovu v blízkosti linie ztavení se základním materiálem. Iniciační vrub byl vždy orientován kolmo ke směru svarových housenek. 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 Matelec. Pro stanovení okamžitých délek trhlin byl použit kalibrační graf pro ocel COR 13/4 viz [5].

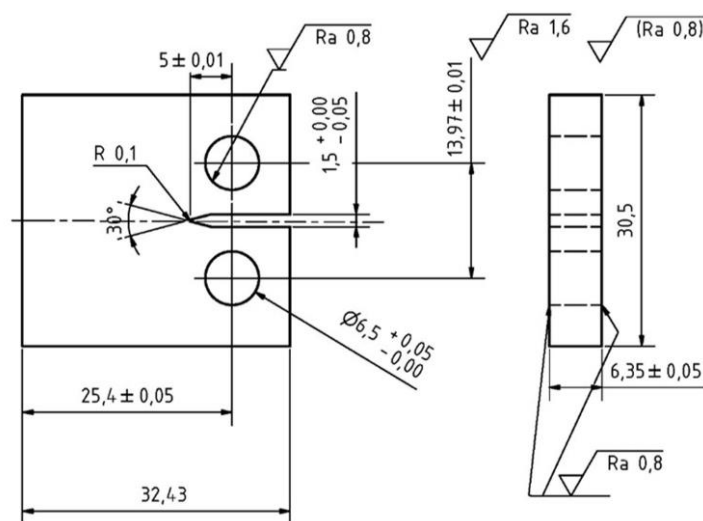
Výsledky a diskuze

Byly hodnoceny dva typy svarů zhotovených metodami 141 a 135 lišících se použitým přídavným materiálem: měkkou martenziticko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER 2209. Byly stanoveny Wöhlerovy křivky svarových spojů exponovaných ve vodě při cyklickém zatěžování s frekvencí 123 Hz, při různých hodnotách asymetrie cyklu: při střídavém namáhání a při statickém předpětí 330 MPa, v intervalu životnosti $10^5 - 5 \times 10^7$ cyklů. Z experimentálně stanovených S-N křivek byly extrapolovány hodnoty časovaných únavových pevností pro 10^9 cyklů – viz obr. 3. Vyšší únavová pevnost byla zjištěna pro variantu spoje s přídavným materiálem duplexní slitinou ER 2209, kdy extrapolované meze únavy při shodných režimech mechanického zatěžování odpovídají časovaným mezím únavy základního materiálu.



Obr. 3: S-N křivky svařované oceli COR13/4

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 $\frac{1}{2}$ " 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

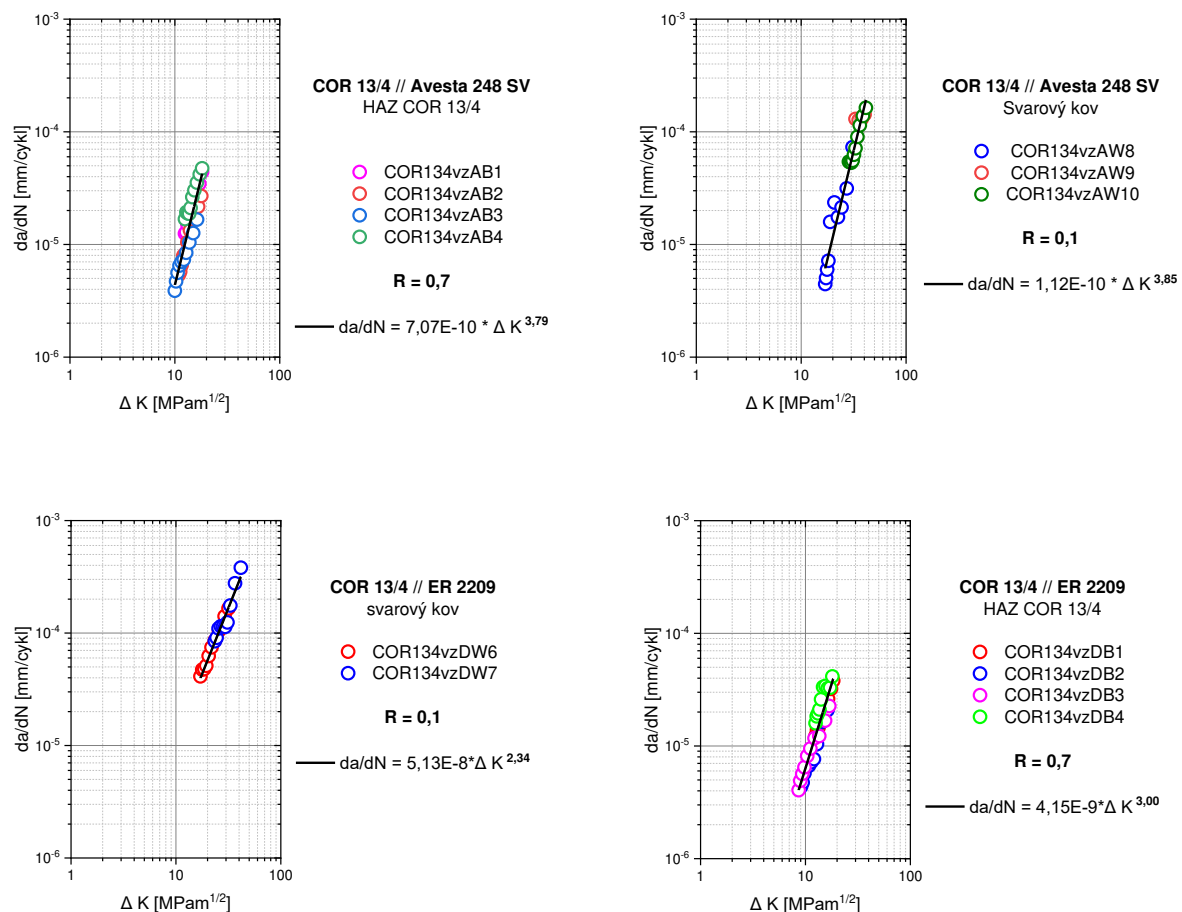
Okamžité délky trhlin byly počítány na základě měřeného elektrického napětí nad trhlinou metodou DCPD a kalibračního grafu pro ocel COR 13/4 ve tvaru:

$$a = 5,051242 + 20,04668 * (U_a/U_r) - 5,03024 * (U_a/U_r)^2,$$

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 [5]. Po ukončení testu byly pro kontrolu výpočtu okamžité délky trhlin určeny konečné délky trhlin z lomových ploch po statickém do-lomení vzorků. Vyhodnocení experimentálních dat je v [6].

Na obr. 5 jsou v grafech zpracovány výsledky stanovení rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněných oblastech základního materiálu při použití přídavného materiálu Avesta 248 SV a slitiny ER 2209 v závislosti na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK . Výsledky jsou platné pro zatěžování v tahu při frekvenci 30 Hz a pro asymetrii cyklu $R = 0,1$.

Pro oba studované svarové spoje byly stanoveny odpovídající koeficienty Parisova vztahu.



Obr. 5: Výsledky stanovení rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněných oblastech základního materiálu při použití přídavného materiálu Avesta 248 SV a slitiny ER 2209 v závislosti na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK

Závěr

Byly hodnoceny dva typy svarů/návarů zhotovených metodami 135 a 141, lišících se použitým přídatným materiálem: měkkou martenzicko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER2209. Svarové spoje byly subdodávkou firmy ČEZ, a. s.

Byly stanoveny Wöhlerovy křivky svarových spojů exponovaných ve vodě při cyklickém zatěžování s frekvencí 123 Hz, při různých hodnotách asymetrie cyklu: při střídavém namáhání a při statickém předpětí 330 MPa, v intervalu životnosti $10^5 - 5 \times 10^7$ cyklů. Z experimentálně stanovených S-N křivek byly extrapolovány hodnoty časovaných únavových pevnosti pro 10^9 cyklů. Svarový spoj M/A materiálem Avesta 248 SV vykazuje ve vodě nižší únavovou pevnost než základní materiál ocel COR 13/4. Únavová pevnost svarového spoje duplexní slitinou ER2209 je stejná jako oceli COR 13/4.

Pro oba studované svarové spoje byla provedena měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněné zóně oceli COR 13/4 na kompaktních vzorcích zatěžovaných v tahu (CT) při frekvenci 30 Hz a hodnotě asymetrie cyklu $R=0,1$, v intervalu rychlostí šíření únavových trhlin $10^{-6}-10^{-4}$ mm/cykl. Byly stanoveny odpovídající koeficienty Parisova vztahu.

Literatura

- [1] PUKASIEWICZ, Anderson, GOUVEIA, Ruimar, CAPRA, André, HENKE, Sérgio a OKIMOTO, Paulo. Effect of interpass temperature on microstructure, impact toughness and fatigue crack propagation in joints welded using the GTAW process on steel ASTM A743-CA6NM. *Welding International*, 2014, vol. 29, pp. 433-440, doi: 10.1080/09507116.2014.932983
- [2] PUKASIEWICZ A.G.M., NOVICKI N., HENKE S.L. a CASAS W.J.P. Fatigue crack propagation in welded joints of the steel CA6NM without post welding heat treatment. In: *17th International Congress of Mechanical Engineering*. November 10-14, 2003, São Paulo
- [3] TRUDEL A. a SABOURIN M. Metallurgical and fatigue assessments of welds in cast welded hydraulic turbine runners. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2014)*, 22 012015.
- [4] ŠPIRIT Z. a BRICÍN D. *Katalog korozně-únavových lomů oceli COR13/4 s metalografickým rozbořem mikrostruktury*, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2022, PL č. 4295.
- [5] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, CHOCHOLOUŠEK, Michal a FULÍN, Zdeněk. *Pevnostní a únavové charakteristiky materiálu GX4CrNi13.4+QT*, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2021, PL č. 3848.
- [6] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, CHOCHOLOUŠEK, Michal a FULÍN, Zdeněk. *Korozně-únavové charakteristiky svarových spojů oceli COR 13/4*, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2022, PL č. 4296.