

# VÝVOJ REALISTICKÝCH VAD PRO ZKUŠEBNÍ TĚLESA

## DEVELOPMENT IN REALISTIC DEFECTS FOR TEST SPECIMENS

Jiří Hodač a Jana Veselá

Centrum výzkumu Řež s. r. o.

### Abstrakt

Pro potřeby kvalifikace nových i stávajících metod nedestruktivního zkoušení je nezbytná schopnost vyrábět zkušební tělesa s realistickými vadami odpovídající vadám detekovaným v provozu energetických zařízení. Centrum výzkumu Řež, proto vyvíjí vhodné efektivní postupy výroby realistických vad realizovatelných v různých materiálech, dílech, nebo konstrukcích s homogenními i heterogenními svary. V článku jsou popsány oblasti, kde byly vyvinuty funkční postupy pro výrobu vad s vysokou mírou shody s vadami z provozu. Pro zjištění charakteru a rozsahu vytvořených vad jsou využívány nedestruktivní i destruktivní metody zkoušení. Popsány jsou zkušební tělesa s korozními, únavovými a výrobními svarovými vadami. Na základě zjištění z praxe jsou též vyvíjeny vady s kombinovaným charakterem.

### Abstract

For qualification of new and current methods of non-destructive testing, it is necessary to be able to produce test specimens with realistic flaws corresponding to flaws detected in the service of power industry devices. The Řež Research Center therefore develops suitable and efficient procedures to produce realistic flaws that can be created in various materials, parts, or constructions with homogeneous and heterogeneous welds. The article describes the areas, where functional procedures have been developed to produce flaws which are very similar to flaws detected in service. Non-destructive and destructive testing methods are used to determine the nature and dimensions of flaws. Test specimens with corrosion, fatigue and manufacturing weld flaws are described. Based on findings from service, flaws with a combined character are also developed.

### 1. Úvod

Včasné nedestruktivní odhalování vad je jednou z nejlepších cest zajištění bezpečnosti provozu, zjišťování životnosti konstrukčních celků i jednotlivých komponent. Proto nacházejí nedestruktivní metody zkoušení (NDT) stále širší uplatnění v rozličných průmyslových odvětvích. Pro správnou funkci NDT technologií je nezbytné ověření citlivosti zvolené metody na hledané vady, společně se správnou kalibrací přístroje a odpovídající kvalifikace obsluhy. Z těchto důvodů je před samotným nasazením NDT technologie v provozu vhodné provést kvalifikační měření na zkušebních tělesech (ZT) s vadami odpovídajícího charakteru. Jednotlivé typy zkušebních těles jsou Centrem výzkumu Řež vyvíjeny ve spolupráci s průmyslovými partnery. Dlouhodobou snahou je výroba realistických vad, které odpovídají vadám vznikajícím v běžném provozu a z pohledu NDT metod jsme identické – tzv. realistické vady. Alternativou realistických vad jsou tzv. vady náhradní s přesně definovanou geometrií a rozměrem, např. vývrt s plochým dnem. Náhradní vady slouží ke kalibraci přístroje a nastavení vyhledávací citlivosti. V článku níže se blíže věnujeme různým typům realistických vad. [1], [2]

Ve vývoji se zaměřujeme na realistické typy vad, které v provozu vedou k náhlému selhání funkce komponent a konstrukčních celků, čímž představují bezpečnostní riziko a mohou způsobit významné ekonomické ztráty. Jedná se zejména o vady, jež nelze odhalit při vizuální kontrole. Příkladem je mezikrystalová koroze v tepelně ovlivněné oblasti svaru, v níž se přednostně šíří trhliny. Naproti tomu plošná koroze je zpravidla dobře vizuálně odhalitelná, sledovatelná a většinou nepředstavuje výrazné riziko náhlého selhání konstrukce. [3], [4]

## 2. Druhy realizovaných vad

Při výrobě zkušebních těles s realistickými vadami jsme se zaměřili na korozní vady, vady únavového charakteru, výrobní vady svarových spojů a jejich kombinace. Všechny níže uvedené vady byly vytvořeny v trubkových ZT o rozměrech  $\text{Ø}89 \times 6,3$  mm. Tento trubkový profil se běžně vyskytuje v energetickém průmyslu a je často prověřován NDT kontrolami, a proto představuje vhodné reprezentativní těleso. Druhy ocelových slitin pro experimenty jsou voleny tak, aby odpovídali jejich výskytu v provozu. [5]

### 2.1 Korozní vady

Korozní vady v průmyslové praxi často stojí na začátku řetězce vedoucího k vytvoření kritické vady z volného povrchu. Korozí iniciovaná na povrchu komponenty snižuje jeho účinný průřez a současně může docházet k vytváření korozních důlků, které působí jako koncentrátoři napětí. Při kombinaci mechanického a korozního zatížení jsou často korozní důlky místy vzniku trhlin. [3], [6], [7]

Závažná korozní poškození vznikají i v relativně neagresivních prostředích vlivem lokální koncentrace agresivních složek prostředí. Nejčastěji se tak děje v místech nahromadění nečistot či korozních produktů. V prostředí potrubních systémů se jedná o korozní úsady. V místě jejich uložení se zvyšuje koncentrace agresivních látek podporujících korozní proces a lokálně zvyšují rychlost korozí součásti. [8]

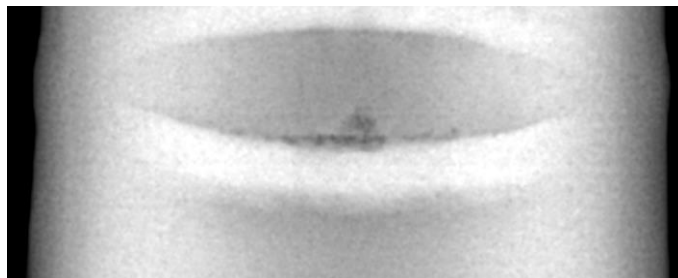
Ke kombinaci degradačních jevů nastává i v místech svarů, kde kořen svaru může vytvořit vhodné místo pro hromadění korozních úsad a usnadnění vzniku korozí. Zde navíc hrozí riziko urychlení korozních jevů v důsledku galvanické korozí (spojení materiálů o rozdílném složení) [9]. Korozí může být lokálně urychlena i v tepelně ovlivněné oblasti svaru v důsledku ochuzení slitiny o korozně protektivní prvek, například chrom. [10]

#### Příklad realizovaných těles

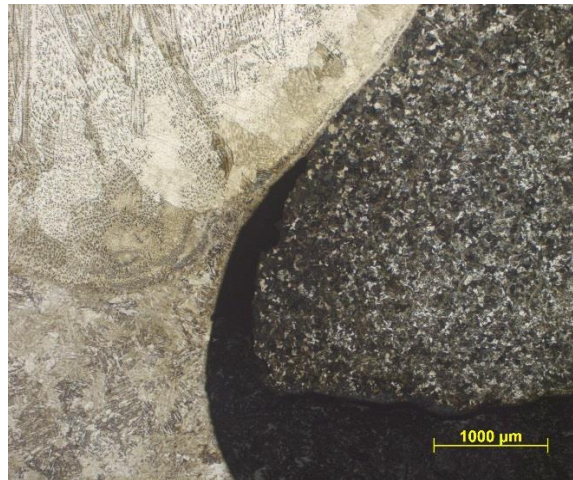
Trubkové zkušební těleso o vnějším průměru 89 mm s heterogenním svarovým spojem ocelí 08Ch18N10T a 22K (norma GOST) bylo vystaveno působení proudícímu vodnému roztoku chloridů. V důsledku galvanické korozí je přednostně rozpouštěna feritická ocel 22K, viz Obr. 1. Korozí je nejintenzivnější přímo na styku svarového kovu a základního materiálu a postupuje úzkou štěrbinou podél svarového úkosu. Tento typ korozního poškození má výrazný vrubový účinek na spoj a snižuje jeho pevnost i životnost, viz obr. 1 až obr. 3. Přítomnost korozních vad byla též ověřena a hodnocena ultrazvukovou technikou Phased Array (PAUT). [11]



Obr. 1: Makroskopický pohled na korodovaný svarový spoj



Obr. 2: Projev korozního poškození na rentgenovém snímku



Obr. 3: Detail heterogenního svarového spoje s postupující korozní vadou. Hloubka průniku koroze od původního volného povrchu potrubí je 1,72 mm.

Vytvořená korozní vada simuluje korozní napadení v potrubních systémech. V okolí svaru lze sledovat úbytek tloušťky stěny trubky. Ve svaru pak sledujeme pronikající korozi s lokálním extrémem na úkosu svaru. Tyto typy vad můžeme použít například pro kvalifikaci nedestruktivní metody zkoušení ultrazvukem (UT) a prozařovací metody (RT).

## 2.2 Únavové trhliny

Únavové trhliny se vyskytují u cyklicky namáhaných dílů. Únavové trhliny představují vysoké riziko zejména pro silnostěnné díly, kde nastávají příznivé mechanické podmínky pro šíření trhlin. Únavové trhliny se v materiálu šíří i při nízkých napětích hluboko pod bezpečnostními limity. Šíří-li se z vnitřních povrchů, například u trubek a nádob, jsou pro vizuální, případně kapilární a magnetické zkoušky z vnějšího povrchu neodhalitelné [1], [4].

Riziková místa pro výskyt únavových trhlin jsou dána především konstrukčně. Trhliny se vyskytují v místech konstrukčních vrubů, mechanického poškození povrchu dílů, ostrého přechodu mezi tuhou a pružnou částí konstrukce apod. [4]

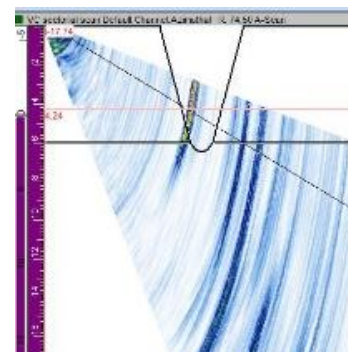
### Příklad realizovaných těles



Obr. 4: Trhlina podél svarového úkosu



Obr. 5: Síť trhlin vedoucích od vrubu ve svaru až do teplem ovlivněné oblasti



Obr. 6: PAUT echo únavové trhliny v prostoru kořene svaru snímku

Trubkové ZT o vnějším průměru 89 mm o tloušťce stěny 6,3 mm z materiálu 304L (ASTM) s homogenním svarem bylo vystaveno kombinovanému cyklickému namáhání za účelem rozvoje trhlin z oblasti kořene svaru, viz obr. 4 až obr. 6. Kořen svaru byl před mechanickým

namáháním oslaben EDM vrubem. Vrub slouží jako iniciátor trhliny a pomáhá v lokalizaci trhliny do požadované oblasti vzorku. K vyvození potřebného namáhání byl použit servohydraulický stroj, viz obr. 7.

Vytvořené únavové trhliny dobře reprezentují vady vznikající v provozu. Každý materiál, způsob svařování a pracovní prostředí zásadně ovlivňuje, kde vady vzniknou a jaký mají charakter. Úprava nastavení parametrů mechanické zátěže pro dosažení požadované vady je běžnou součástí výroby zkušebních těles. Tělesa s realistickými únavovými trhlínami jsou využívána pro kvalifikace NDT metod UT, RT, MT (magnetické metoda prášková), MMM (magnetická paměť materiálu) a v případě průchozích trhlín i PT (kapilární metoda).



Obr. 7: Příklad způsobu aplikace cyklické mechanické zátěže svarového spoje

### 2.3 Výrobní vady svarů

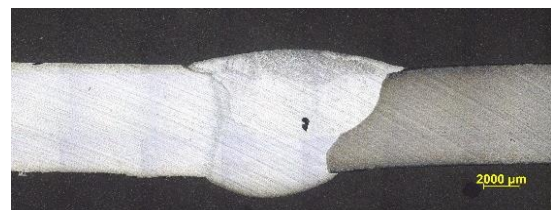
Představují speciální skupinu vad, která je vytvořena přímo během procesu svařování. Výrobní vady vznikají v praxi neúmyslně a nelze je zcela eliminovat. V praxi se můžeme setkat s detekovanými, ale přípustnými vadami, které ve spoji zůstávají po celou jeho životnost. Tyto vady se u klíčových komponent pravidelně sledují, zda nedochází k jejich rozvoji, nebo propojování. [1], [12]

Ve vývoji se zabýváme pouze výrobou vad, které jsou neodhalitelné povrchovými metodami VT, PT nebo MT, ale zároveň představují riziko selhání spoje. Patří sem tedy vady typu porozita, neprůvar, zavařená struska, neprovařený kořen apod. Na obr. 8 až obr. 11 je uvedeno srovnání DT a NDT hodnocení dvou výrobních vad heterogenního svarového spoje.

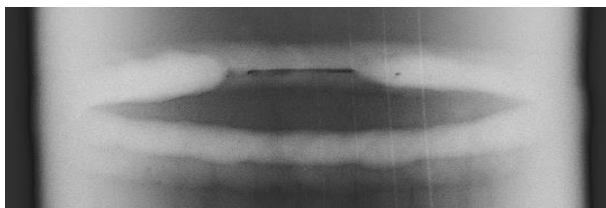
#### Příklad realizovaných těles



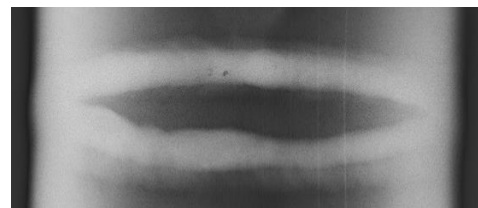
Obr. 8: Makrofotografie metalografického výbrusu – vzorek A s vadou typu neprůvar v kořeni.



Obr. 9: Makrofotografie metalografického výbrusu – vzorek B s vadou typu porozita.



Obr. 10: Rentgenové snímky odpovídajících vzorků – vzorek A



Obr. 11: Rentgenové snímky odpovídajících vzorků – vzorek B



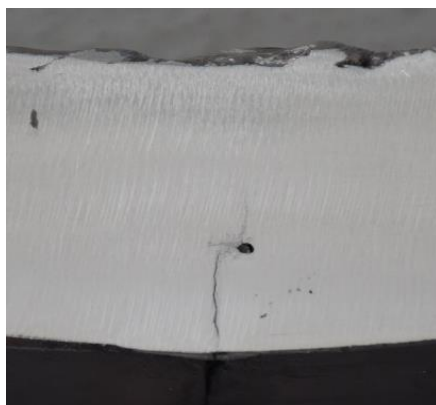
Svarové vady jsou vytvářeny porušením technologického postupu či svařovacího předpisu (WPS) ve zvolené lokalizované oblasti pro vytvoření požadovaného typu vady. Svar musí z pohledu vizuální kontroly vyhovovat a koruna svaru nesmí vykazovat patrné odchylky v místě vytvořené vady.

Heterogenní svarový spoj znesnadňuje ultrazvukovou zkoušku a vada je zpravidla dobře detekovatelná pouze ze strany feritické oceli. V praxi navíc může být situace komplikována špatným přístupem ke kontrolovanému spoji, nátěrem, izolací apod.

#### 2.4 Kombinování vad

V praxi se vyskytují vady vznikající v důsledku působení více různých činitelů zároveň, a proto mívají komplikovanější charakter. Například poškození rozvíjející se z korozního napadení, pokračující jako korozní praskání pod napětím s rozvíjející se trhlinou, která se šíří ve svarovém spoji přes vnitřní výrobní vady vedoucí k porušení těsnosti, nebo soudržnosti spoje. Z výše uvedeného je patrné, že provozní vady mohou mít různý charakter a v průběhu jejich rozvoje se mohou upřednostňovat různé způsoby degradace spoje. Napodobíme-li tyto kombinace, získáváme velice realistické vady s vysokou mírou shody s vadami z provozní praxe.

V provozu jsou komponenty vystaveny souběžnému působení mnoha vlivů, a proto i vznikající vady mají často kombinovaný charakter. Typickým příkladem místa s kombinovaným namáháním jsou parogenerátory, kde na vnitřní stěně nádob a potrubí zároveň působí mechanické, korozní a tepelné namáhání. V pokračujícím vývoji realistických vad se zaměřujeme na výrobu kombinovaných vad, viz obr. 12.



Obr. 12: Makrosnímek příčného řezu ZT se svarem. Únavová trhlina mění svůj původní směr a napojuje se na vnitřní vadu (pór). Dále pokračuje ve směru kolmém na hlavní napětí ve spoji.

### 3. Závěr

Na základě provedených měření můžeme hodnotit vytvořené realistické vady jako vady, které se svým charakterem blíží provozním vadám. Oproti náhradním vadám poskytují přídavnou hodnotu právě svojí podobností s reálnými, provozními vadami. Tělesa s náhradními vadami jsou často využívána jako kalibrační měřky, zatímco ZT s realistickými vadami jsou vhodná pro kvalifikaci postupů zkoušení zejména metod UT, RT nebo je lze využít pro kvalifikaci personálu NDT.

#### Poděkování

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] Kopec, B., Šmíd, R. (2008): *Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukci*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno.
- [2] Yoneyama, H., Miharada, H. (2003): *Comparison of Echo Heights between Fatigue Crack and EDM Notch*. Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol. 41, pp. 115-122. ISSN 0387-0154
- [3] Novák, P. (2011): *Koroze kovů*. Konzervování a restaurování kovů, TM Brno, AMG ČR, Brno, kapitola 3, str. 136–198.
- [4] Růžička, M., Hanke, M., Rost, M. (1987): *Dynamická pevnost a životnost*. České vysoké učení technické v Praze, Praha.
- [5] Norek, M. (2017): *Návrh a kvalifikace oprav svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Plzeň.
- [6] ASM International (2000): *Corrosion: Understanding the Basics*. ASM International, [online]. Available at:  
[https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06691g\\_chapter\\_1.pdf](https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06691g_chapter_1.pdf)
- [7] Novák, P. (2005): *Druhy koroze kovů*. Koroze a ochrana materiálu, roč. 49, str. 75-82. ISSN 0452-599X
- [8] Vosmík, Z. (2018): *Výskyt koroze a úsad při ohřevu vody ve výměnících tepla a jejich vliv na nerezovou ocel a provoz výměníku*. Dostupné z: <http://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-1.korozni-vlivy.pdf>
- [9] Belkessa, B., Miroud, D., Ouali, N., Cheniti, B. (2016): *Microstructure and Mechanical Behavior in Dissimilar SAF 2205/API X52 Welded Pipes*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 29, pp. 674-682. ISSN 1006-7191
- [10] Arlt, N., Burkert, A., Isecke, B. (2011): *Korozivzdorné oceli ve styku s jinými kovovými materiály*. Publikáční řada Materiály a aplikace, Euro Inox, roč. 10, [online]. Dostupné z: [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/Contact\\_with\\_Other\\_CZ.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Contact_with_Other_CZ.pdf), ISBN 978-2-87997-324-1
- [11] Veselá, J. (2018): *Nedestruktivní a destruktivní hodnocení korozního poškození a rozvoje trhlin vzorků heterogenních svarových spojů*. *Konference Defektoskopie 2018*.
- [12] Kolář, J. (2014): *Aplikace pokročilých technik ultrazvukového zkoušení svarových spojů*. Konstrukce, roč. 5/2014, str. 64-68. ISSN 1803-8433

## Použité zkratky

NDT – Nedestruktivní zkoušení (z anglického Non Destructive Testing)

ZT – Zkušební těleso

UT – Ultrazvukové zkoušení (z anglického Ultrasonic Testing)

RT – Radiografické zkoušení (z anglického Radiographic Testing)

MT – Magnetická prášková metoda (z anglického Magnetic particle Testing)

MMM – Magnetická paměť materiálu (z anglického Metal Magnetic Memory method)

PT – Kapilární zkoušení (z anglického Penetrant Testing)

DT – Destruktivní zkoušení (z anglického Destructive Testing)