

# MODERNÍ DIAGNOSTIKA PRO MONITOROVÁNÍ DEFORMACÍ VYSOKOTEPLŮTNÍCH KOMPONENT ZA PROVOZU

## MODERN DIAGNOSTICS FOR MONITORING DEFORMATION OF HIGH-TEMPERATURE COMPONENTS IN OPERATION

Michal Vajdák, Kateřina Bonaventurová a Pavel Urban

Sobriety s.r.o.

### Abstrakt

Potenciálová metoda je vhodným nástrojem pro online monitorování stavu parovodů a produktovodů. Měření lze provádět za plného provozu bez nutnosti dalších zásahů. Výsledkem měření je informace o změně tloušťky stěny, deformace, či změně velikosti trhliny. Aplikace je vhodná pro provozy s nebezpečím koroze, změn zatížení a deformací, nebo pro indikaci vzniku trhlin zejména na svarových spojích.

### Abstract

The Potential Method is a suitable tool for online monitoring of the status of the pipelines. Measurements can be performed in full operation without the need for further intervention. The result of the measurement is information about the change in wall thickness, deformation or crack size change. Application is suitable for operations with corrosion, load and deformation changes, or crack indications especially on welded joints.

### Úvod

Potenciálové metody jsou používány především v oblasti materiálového testování při měření materiálových parametrů kovových vzorků na zkušebních strojích, a to především v oblasti měření růstu trhlin. Jejich nasazení v industriálním světě jako diagnostické metody však není až tak běžnou aplikací. Velkou překážkou je absence zkušeností s dlouhodobými instalacemi, přičemž právě při dlouhodobém monitorování může potenciálová metoda ukázat svoji unikátnost. Proto, ve spolupráci s ČEZ, a. s. byly v minulých 20 letech instalovány desítky míst na kritických částech parovodů, poblíž svarů a tvarových změn, které jsou limitujícím faktorem pro životnost parovodů v konvenční energetice a teplárenství.

### Potenciálové metody

Mezi potenciálové metody patří kromě metod vířivých proudů ([1, 2] a obr. 1 vpravo), potenciálové metody střídavé (ACPD) a stejnosměrné (DCPD; [3] a obr. 1 vlevo).

Potenciálové metody se setkávají s tzv. skin efektem – povrchovým jevem, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Hloubka vniku  $\delta$  [m] u skin efektu je počítána dle vztahu

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (1)$$

kde  $\rho$  je rezistivita materiálu [ $\Omega$  m],  $f$  je frekvence proudu [Hz] a  $\mu$  je absolutní magnetická permeabilita [NA–2]. (Hloubka vniku  $\delta$  je definována jako hloubka, ve které klesne hodnota proudu pod 36,8 % hodnoty proudu na povrchu.)

Základním rozdílem mezi střídavými a stejnosměrnými potenciálovými metodami je fakt, že střídavé metody využívají výše popsaného skin efektu k vymezení hloubky průniku elektrického pole a tím i vymezení efektivního průřezu protékajícího elektrickým proudem viz rovnice 1.

Měřicí frekvence střídavých potenciálových metod se běžně pohybují v řádech desítek kHz. Oproti střídavým metodám se stejnosměrné metody vyznačují výrazně vyššími používanými proudy v řádech desítek ampér. Aby se předešlo nadměrnému a nežádoucímu zahřívání vzorku, provádí se měření stejnosměrnou potenciálovou metodou pulzně.

Firma Sobriety [5], která je autorem tohoto článku, spolu s výzkumnou organizací Techlab [6] pracuje s tzv. potenciálovou metodou dle Ing. Ladislava Korce, CSc., která je specifikovaná v následující kapitole. Dále pak následují vybrané ukázky z praktických aplikací.

### **Potenciálová metoda dle Ing. Ladislava Korce, CSc.**

Potenciálová metoda v modifikaci Ing. Korce [4] je ve své podstatě kombinací výhod výše uvedených střídavých a stejnosměrných potenciálových metod.

Z kladných vlastností stejnosměrných potenciálových metod přebírá tato metoda zejména schopnost měřit i materiály neměřitelné střídavými metodami, dobrou opakovatelnost, možnost měření hloubkových vad a trhlin na vnitřních stranách potrubí a nezávislost na poloze přívodních vodičů. Z kladných vlastností střídavých potenciálových metod jde především o použití nízkého měřicího proudu (typicky 1 A), což umožňuje použití lehčích přívodních vodičů, souvislé měření bez rizika nadměrného přehřívání vzorku, bateriový provoz a s tím související lepší mobilitu aparatury.

Metoda využívá rozdílných vlastností geometricky odlišných potenciálových polí, formovaných v okolí proudových elektrod. Základní průběhy elektrického potenciálu  $U(x)$  (přímkový, rovinný a prostorový) v závislosti na vzdálenosti  $x$  od proudové elektrody jsou uvedeny v tabulce 1. Charakteristické průběhy potenciálu mezi dvěma elektrodami vznikají poté superpozicí polí kladné a záporné elektrody, plus konkrétní tvar elektrického pole závisí konkrétně na geometrii sledovaného vzorku a volbě vzdáleností proudových elektrod.

Rovnice, uvedené v tabulce 1 lze analyticky odvodit ze základních elektromagnetických zákonů [7]. Charakteristické průběhy potenciálu pro zkoumané vzorky lze předpovědět i pomocí standardních MKP simulací, kde lze elektrický potenciál (spád elektrického napětí) simulovat pomocí teplotního spádu, viz. reference o analogiích teplotních a elektrických úloh [9], [10]. Na obr. 2, snímek dole je po zajímavost zobrazena vizualizace obecného potenciálového pole reprezentujícím MKP modelem o parametrech válcové trubky reprezentující reálný kus parovodu softwarem Ansys, [8].

Na obr. 2, snímek nahoře je příklad uspořádání elektrodového systému pro monitorování deformací vysokoteplotních komponent za provozu, díky kterému lze například analyzovat creepovou deformaci označenou  $\varepsilon_i$  ve směrech referenčních elektrod i ve vzdálenosti  $s$  jako

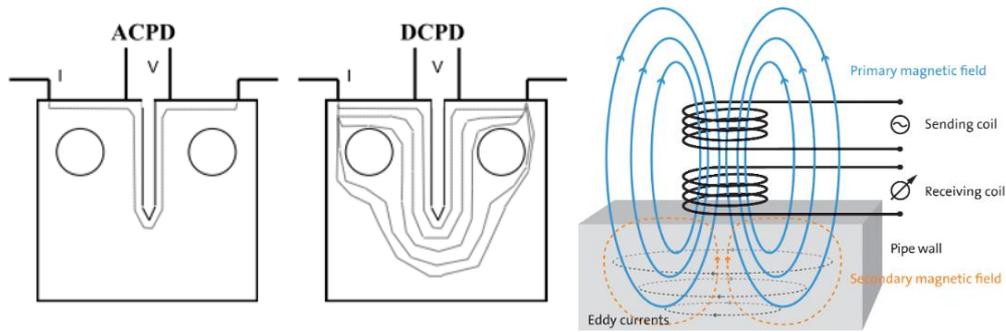
$$\varepsilon_i = \frac{S_i^0}{S_i} - 1, \quad (2)$$

kde  $S_i^0$  je počáteční napětí v daném směru referenčních elektrod ve vzájemné vzdálenosti  $s$  a  $S_i$  je měřené napětí v daném směru referenčních elektrod ve vzájemné vzdálenosti  $s$ .

### **Příklady z praxe**

Obr. 3 a obr. 4.

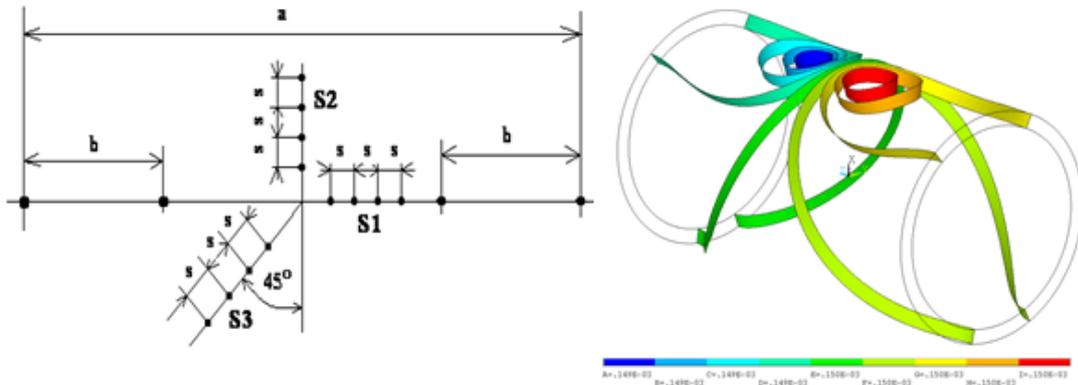
## Tabulky a obrázky



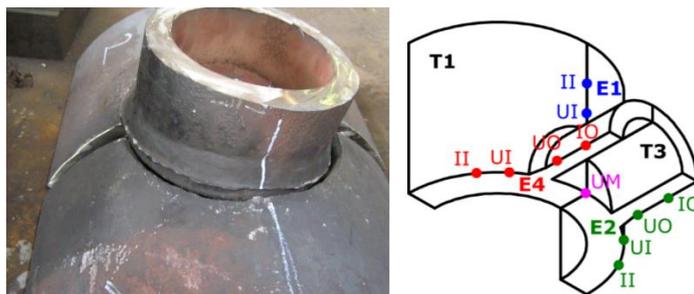
Obr. 1: Snímek vlevo – trajektorie protékajícího proudu v okolí trhliny zkušební vzorku při aplikování střídavé (ACPD) (snímek vlevo) či stejnosměrné (DCPD) (snímek vpravo) potenciálové metody [3]. Snímek vpravo – schéma principu metody vířivých proudů pro diagnostiku materiálů [1].

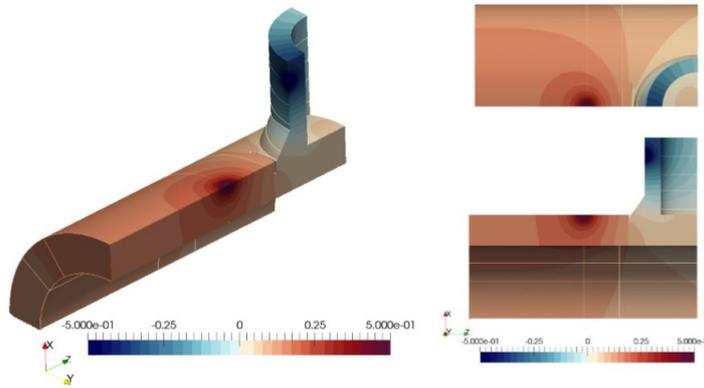
Tabulka 1: Základní průběhy elektrického potenciálu  $U(x)$  v závislosti na vzdálenosti  $x$  od proudové elektrody.  $I_M$  je měřící proud,  $\rho$  je měrný odpor materiálu,  $S$  je příčný průřez materiálu.

Základní průběh elektrického potenciálu $U(x)$		
Přímkové pole	Rovinné pole	Prostorové pole
$U(x) = I_M \frac{\rho}{S} x$	$U(x) = I_M \frac{\rho}{t} (-\ln x)$	$U(x) = I_M \rho \frac{1}{x}$

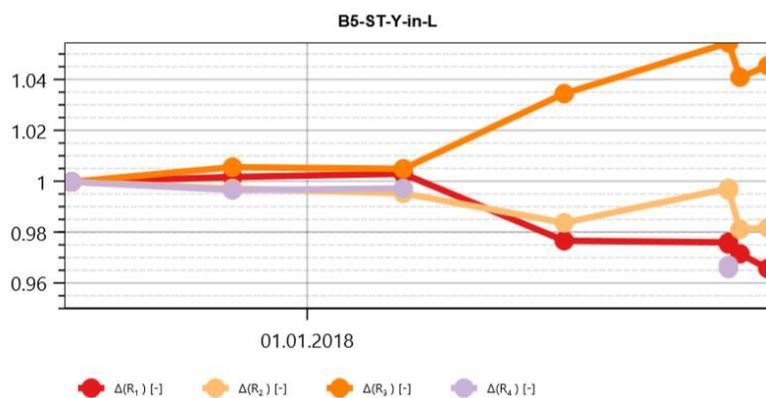


Obr. 2: Příklad uspořádání elektrodového systému pro monitorování deformací vysokoteplotních komponent, snímek vlevo. Snímek vpravo – vizualizace obecného potenciálového pole reprezentujícím MKP modelem o parametrech válcové trubky reprezentující reálný kus parovodu – software Ansys, [8].





Obr. 3: Snímek nahoře vlevo – porušené parovodní potrubí v místě závěsu. Snímek nahoře vpravo – rozmístění elektrod. Snímek dole – MKP simulace – rozložení elektrického potenciálu [mV] za přítomnosti vnější rovné trhliny. [11]



Obr. 4: Diagnostika potenciálovou metodou na svarech parovodů, Počerady. Nárůst potenciálu více než +2 % signalizující vznik trhliny. Trhлина potvrzena ultrazvukem.

## Literatura

- [1] [http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage\\_testing\\_prevention\\_and\\_detection\\_in\\_aero\\_nautics.htm](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aero_nautics.htm)
- [2] Hennigar, T., Wright, M. (2012): *Eddy Current Testing Technology*.
- [3] Spositom, G. (2009): *Advances In Potential Drop Techniques For Non-Destructive Testing*. Non-Destructive Testing Group, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ.
- [4] Korec, L. (2014): *Měření deformace při tečení materiálu potenciálovou metodou*. Praha: Techlab s.r.o.
- [5] <http://www.sobriety.cz>
- [6] <http://www.techlab.cz/>
- [7] Bonaventurová, K. (2018): *Výzkum metodiky měření potenc. metodou*. Sobriety.
- [8] <http://www.svsfem.cz>
- [9] [http://www.ingaero.uniroma1.it/attachments/2176\\_Cap\\_3\\_Thermal-electrical\\_analogy.pdf](http://www.ingaero.uniroma1.it/attachments/2176_Cap_3_Thermal-electrical_analogy.pdf)
- [10] [http://www.dartmouth.edu/~sullivan/22files/System\\_analogy\\_all.pdf](http://www.dartmouth.edu/~sullivan/22files/System_analogy_all.pdf)
- [11] Sobriety (2017): *Výzkum pro umožnění bezpečného provozu parovodů s čepovými závěsy*.