

SLEDOVÁNÍ KOROZE ROZVODŮ VODY NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI AKUSTICKÉ EMISE A PRŮTOKOVÉ TURBIDIMETRIE BĚHEM ODKALOVACÍCH ZÁKROKŮ

**Ing. Milan Chlada, Ph.D.¹⁾, Ing. Zdeněk Převorovský, CSc.¹⁾,
RNDr. Petr Gabriel, Ph.D.²⁾, doc. Ing. Petr Sladký, CSc.^{1,2)},**

¹⁾ Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., Dolejškova 1402/5, 182 00 Praha 8

²⁾ Katedra chemické fyziky a optiky, MFF UK, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2
chlada@it.cas.cz, sladky@karlov.mff.cuni.cz

ÚVOD

Koroze vodovodních rozvodů způsobuje provozovatelům i spotřebitelům nemalé problémy, ať již se jedná o finanční ztráty nebo snížení uživatelského komfortu v podobě výpadků dodávek pitné vody, či zhoršení její kvality [1]. V krajním případě může být koroze příčinou poškození vodovodního potrubí spojeného s případnou destrukcí terénu. V méně závažném případě, avšak ze spotřebitelského hlediska nezanedbatelném, způsobuje koroze vodovodních rozvodů znečištění dopravované pitné vody korozními produkty v podobě kalových částic. V případě klasických rozvodů z litiny a oceli bývá pitná voda znečištěna koloidními kalovými částicemi různých forem železa. Je proto žádoucí sledovat korozi zvláště starších vodovodních rozvodů zhotovených z těchto kovů.

Pro uvedené účely byla vyvinuta řada metod kontroly a diagnostiky havarijních i nehavarijních korozních stavů vodovodních rozvodů [2]. Většina z nich je založena na chemických a elektrochemických principech stanovení a hodnocení korozních procesů [3]. Znalosti o generování a šíření elastických vln v materiálech pak využívají fyzikální metody aplikované zvláště k detekci poruch vodovodních rozvodů spojených s únikem vody [4,5]. Jedná se o přístupy ověřené a převzaté např. ze systémů preventivní kontroly bezpečnosti jaderné a palivové energetiky, či chemického průmyslu [6]. Ke sledování stavu rozvodů a zásobníků plynů a kapalin včetně pitné vody se poslední dobou stále častěji používá metoda akustické emise (AE) [7,8]. Vedle ní dochází rovněž k významnému rozvoji diagnostiky kritických stavů konstrukčních dílů metodami nelineární elastické vlnové spektroskopie [9]. Výše uvedené metody umožňují sledovat různé typy a stavy poškození materiálů vlastních vodovodních rozvodů, nikoliv však v korelaci se znečištěním distribuované vody korozními produkty.

Předložená vyhledávací studie je věnována možnostem zmenšení výše uvedených nedostatků současným sledováním a korelováním korozního poškození vodovodních rozvodů a distribuované vody produkty koroze kombinovanými akustickými a optickými metodami. Zvláště pak nedestruktivní metodě akustické emise detekující korozní poruchy materiálů vodovodních rozvodů a turbidimetrii dopravované pitné vody nesoucí korozní kalové částice.

Pro účinné řešení bylo nejprve účelné pomocí zkušebních korozních štítků studovat vztah mezi rychlostí koroze vlastního korodovaného materiálu [10], kinetikou intenzity

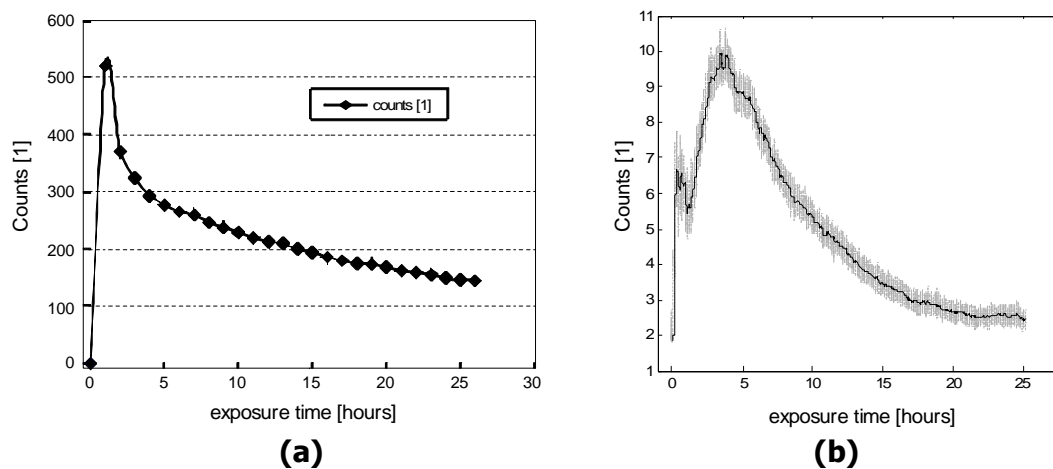
signálů AE [11,12,13] a kinetikou tvorby turbidity disperze produktů koroze v modelových korozivních prostředích s cílem porovnání uvedených metod a možností jejich praktického využití.

Druhým úkolem této vyhledávací studie bylo sledování možností využití identifikace a lokalizace zdrojů AE nově vyvinutou metodou využívající neuronové sítě [8] ve zkušební sekci potrubního rozvodu s možností excitační modulače řízením výtoku dopravované anebo zkušební kapaliny během odkalování.

HODNOCENÍ KOROZE MATERIÁLŮ AKUSTICKOU EMISÍ A TURBIDIMETRIÍ

Akustickou emisí rozumíme elastické vlny (v akustické či ultrazvukové oblasti frekvencí) vznikající následkem náhlého uvolnění energie v materiálu důsledkem lokální, dynamické a nevratné změny jeho struktury [13]. K těmto změnám vede deformace anebo porušení strukturní integrity pevné látky. AE doprovází celou řadu jevů, jako jsou zemětřesení, laviny, sesuvy půdy, důlní otřesy a v neposlední řadě šíření trhlin v materiálech. Vlny, jejichž zdrojem je rostoucí defekt v materiálu konstrukce, se po dosažení povrchu tělesa transformují na povrchové vlny, kde jsou piezoelektrickým snímačem převedeny na elektrický, tzv. emisní signál, který je možné detekovat jako signály AE na značnou vzdálenost od vysílacího zdroje. Při použití vícekanálové detekční aparatury lze takový zdroj s dostatečnou přesností také okamžitě lokalizovat.

Akustická emise byla během experimentu monitorována analyzátozem AE Dakel XEDO. Zaznamenávány byly emisní parametry jako energie (RMS) a počet překmitů signálu přes různé prahové úrovně (viz obr.1 a,b – Counts). Kinetika AE ukázala, že koroze štítků hliníku probíhala oproti litině se zpožděním v důsledku vrstvy aluminium oxidu. Paralelně s AE byl sledován i vývoj turbidity produktů koroze ve dvou úhlech rozptylu světla. Vznik koloidních produktů koroze Fe a Al štítků byl detekován s hmotnostní citlivostí lepší než 0,1 ppm, odpovídající úbytku tloušťky korozních štítků menší než 10 nm, svědčící o vysoké citlivosti použitého přístroje [14]. Pomocí uvedeného přístroje bylo zjištěno, že koloidní produkty koroze Fe jsou převážně menší než jeden mikrometr a Al naopak, což je důležité pro popis jejich tvorby a šíření v nádobách a potrubních rozvodech pitné vody i jiných produktů.



Obr. 1. Typický průběh emisní aktivity, zaznamenané během korozního procesu zkušebních korozních štítků. (a) litina – záznam s ručním zápisem, (b) hliník – automaticky zaznamenané četnosti emisních překmitů jsou znázorněny šedou tečkovanou čarou, silná černá čára je jejich klouzavý průměr [11]

LOKALIZACE ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE V POTRUBÍCH A NÁDOBÁCH

Dostatečně přesná znalost polohy zdroje AE je základním požadavkem pro další charakterizaci mechanismu poruchy. Standardní lokalizační algoritmy (jako např. triangulační algoritmus) vycházejí při analytickém výpočtu souřadnic zdroje AE z časových diferencí příchodů signálu k jednotlivým snímačům a rychlosti šíření elastických vln. Jelikož nejsou vhodné pro složitější konstrukce a anizotropní materiály, byly vyvinuty nové metody. Za předpokladu, že detekované vlny se šíří po geometricky nejkratších cestách uvnitř či na povrchu materiálu, je možné vycházet z nejpřímější trasy mezi snímačem AE a místem emisního zdroje a parametrizovat chronologii příchodů signálů k jednotlivým snímačům. Nově zavedený přístup k lokalizaci zdrojů AE pomocí časových profilů [8] využívá interpolačních schopností umělých neuronových sítí ve vícerozměrných parametrických prostorech. Výhodným předzpracováním naměřených časů příchodů signálů k jednotlivým snímačům zaručuje navíc univerzálnost konkrétní naučené neuronové sítě, přesněji nezávislost na změně materiálu a měřítka. Předpokládáme konfiguraci N snímačů AE umístěných na obecném tělese. Označme T_i dobu šíření elastické vlny od zdroje ke snímači S_i resp. čas příchodu signálu k senzoru. Časový profil (arrival time profile - ATP) je vektor s následovně definovanými složkami p_i :

$$p_i = \frac{N T_i - \sum_{j=1}^N T_j}{\sum_{k=1}^N \left| T_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \right|} \quad (1)$$

Časové profily zohledňující chronologii příchodů signálu k jednotlivým sensorům lze počítat rovněž ze vzdáleností d_i (snímač-zdroj) podle příslušných modifikací definičního vzorce (1). Triviálním odvozením lze navíc dokázat nezávislost na změně rychlosti elastické vlny. Obdobně se vykrátí jakýkoliv násobek vzdáleností d_i , tedy změna měřítka materiálu. Ve smyslu této „univerzality“ mohou být neuronové sítě učeny numericky generovanými daty, odvozenými ze vzdáleností naměřených na proporcionálním modelu uvažované konstrukce nebo její fotografii. Ve fázi vybavování, kdy jsou na vstupy sítě předkládána neznámá data, je možné zpracovávat časové profily počítané již ze skutečných časů příchodů.

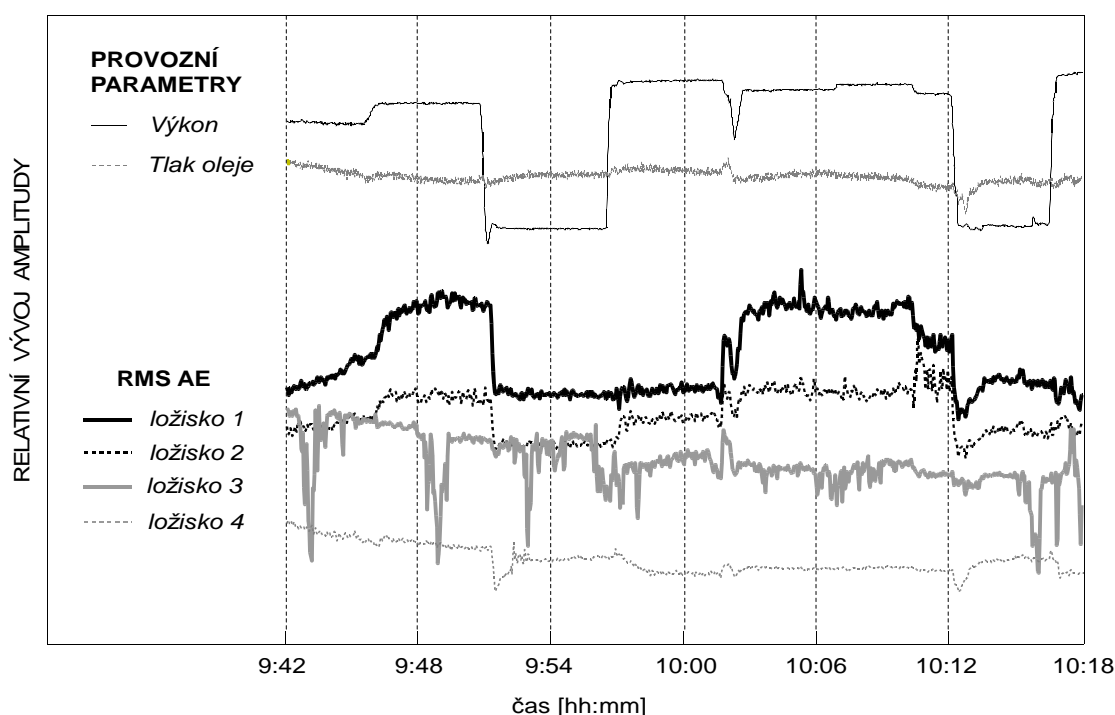
MODELOVÉ PŘÍKLADY APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE S VYUŽITÍM UMĚLÝCH NEURONOVÝCH SÍTÍ

Pro lokalizaci zdrojů AE (rozvoj materiálových defektů i úniky tekutin) je výhodné využít generalizačních schopností umělých neuronových sítí, které jsou schopny postihnout složitější topologii „časoprofilového“ vstupního prostoru a jsou tak na rozdíl od standardizovaných algoritmů aplikovatelné i na komplikovanější tělesa. Neuronové sítě jsou tedy pomocí numericky vygenerovaných tréninkových dat učeny odhadovat souřadnice emisního zdroje na základě časových profilů jakožto vstupů (viz obr.2).

Na obr.3 je uveden příklad konfigurace snímačů AE na modelové části potrubního rozvodu pro účely lokalizace vznikajících trhlin v materiálu, nebo úniků tekutin. Počet snímačů je v praxi dán požadovanou přesností detekce polohy poruchy, tj. větší věrohodnost výsledků je podmíněna vyšším počtem vhodně umístěných senzorů.

sledovaných veličin, jako jsou celkový hluk a vibrace, zvláštní akustické až ultrazvukové projevy zahrnuté pod pojem akustická emise, přehřívání, optické a další parametry mazacích olejů apod.

V případě složitých mechanických rozvodů je nutné předpokládat emisní události, které nejsou časově oddělené. Mohou být generovány řadou fyzikálních jevů, jako jsou např. plastické deformace povrchu kovů při tření, či únik kapaliny trhlinou v potrubí nebo nádobě. Jedná se o tzv. spojitou akustickou emisi. Díky současné nejmodernější měřicí aparatuře je možné tyto akustické signály kontinuálně zaznamenávat i v ultrazvukové části frekvenčního spektra. Obr. 4 uvádí typický vývoj intenzity akustické emise z převodového ústrojí čerpadla v závislosti na přenášeném výkonu. Je patrná korelace RMS akustické emise a zatížení čerpadla. Případná detekce a klasifikace poruch je otázkou detailnější analýzy spojitých signálů AE pokročilými metodami z oblasti analýzy signálů, statistiky a umělé inteligence.



Obr. 4. Vývoj energie AE v závislosti na provozních parametrech

ZÁVĚR

Byla vyvinuta nová metoda sledování koroze rozvodů vody, založená na současném měření a korelačním hodnocení akustické emise a turbidity. Metoda umožňuje současně sledovat, lokalizovat a korelovat stupeň korozního poškození rozvodů a kvality dopravované vody korozními produkty. V případě potrubí se jedná o poškození typu rovnoměrné koroze (uniform corrosion), důlků (pits), štěrbin (crevices) a trhlin (cracks).

V případě dopravované vody se jedná o poškození její kvality kalovými částicemi různé velikosti a složení, počínaje koloidním železem nebo sedimentující rzi a konče zbytky úpravárenských částic anebo částic mikrobiologického původu. Podstata metody a její provádění se ukázaly natolik nadějně, že byly přihlášeny k patentové ochraně.

Část příspěvku byla zpracována v rámci projektu MPO ČR č. FR-TI1/198

Literatura

1. Hušková R., Kožíšek F.: Aplikace principu HACCP (Analýzy a určení kritických kontrolních bodů) při výrobě a distribuci pitné vody. Sborník z konference „Pitná voda 2004“, VII. ročník (Tábor 7.-10.6.2004). Vydal W&ET Team. ISBN 80-239-2936-4, 2004, 191-196.
2. Makar J., Chagnon N.: Inspecting Systems for leaks, pits and corrosion. Journal AWWA vol. 91, No. 7, 1999, 36-45.
3. Kovac J., Alaux C., Marow T.J., Govekar E., Legat A.: Correlations of electrochemical noise, acoustic emission and complementary monitoring techniques during intergranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel. Corrosion Science 52, 2010, 2015-2025.
4. Miller R.K., Pollock A.A., Watts D.J., Carlyle J.M., Tafuri A.N., Yezzi Jr. J.J.: A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. NDT&E International 32, 1999, 1-8.
5. Tang X., Liu Y., Zheng L., Ma Ch., Wang H.: Leak Detection of Water Pipeline Using Wavelet Transform Method. IEEE computer society, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 2009, 217-218.
6. Deriugin A., Dolgikh V., Razuvaev I., Shiriaev A., Vustin V.: Increasing uptime and safety of the refinery and chemical plants through integrated condition monitoring. NDT for Safety, 7.-9.Nov. 2007, Praha.
7. Brunner A.J., Barbezat M.: Acoustic Emission Monitoring of Leaks in Pipes for Transport of Liquid and Gaseous Media: A Model Experiment. Advanced Materials Research 13-14, 2006, 351-356.
8. Chlada M., Převorovský Z., Blahacek M.: Neural Network AE Source Location Apart from Structure Size and Material, Journal of Acoustic Emission, vol. 28, 99#108, 2010.
9. Převorovský Z.: Kombinace dvou Ultrazvukových NDT metod při tvorbě SHM systému. (Conjunction of two ultrasonic NDT methods in SHM systém). Czech Society for Nondestructive Testing, NDE for Safety / DEFECTOSKOPIE 2010, 10.-12.Nov. 2010, Plzeň.
10. Kasai N., Utatsu K., Sosoon P., Kitsukawa S., Sekine K.: Correlation between corrosion rate and AE signal in an acidic environment for mild steel Corrosion Science 51, (2009) 1679-1684.
11. Kober J., Převorovský Z.: Nondestructive evaluation of corrosion damage of Al-alloys by in-situ AE monitoring and nonlinear elastic wave spectroscopy testing. In NDT in Progress 2011. Brno: University of Technology Brno, 2011. S. 143-148. ISBN 978-80-214-4339-6.
12. Jirarungsatian C., Prateepasen A.: Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission. Corrosion Science 52, 2010, 187-197.
13. Miller R.K., McIntire P.: Nondestructive testing handbook; v.5. (American Society for Nondestructive Testing, INC., USA, ISBN 0-931403-02-2, 1987)
14. Sladký P., Gabriel P.: Normativní stanovení zákalu a barvy vody přímo v odběrných vzorkovacích lahvích, zkumavkách a EPA vialkách – viz článek v tomto sborníku.