

# DETEKCE PORUCH POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE (AE) V PODMÍNKÁCH VYSOKOTEPLOTNÍHO CREEPU

## DETECTION OF DEFECTS BY ACOUSTIC EMISSIONS (AE) UNDER HIGH-TEMPERATURE CREEP CONDITIONS

Jiří Dvořák <sup>a)</sup>, Václav Sklenička <sup>a)</sup>, Petr Král <sup>a)</sup>, Marie Kvapilová <sup>a)</sup>, Marie Svobodová <sup>b)</sup>, Jan Šifner <sup>c)</sup> a Václav Koula <sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

<sup>b)</sup> UJP PRAHA a.s.

<sup>c)</sup> Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech. DAKEL – Středisko technické diagnostiky

### Abstrakt

Současné aplikace akustické emise (AE) jsou přednostně orientovány na průběžný monitoring provozu strojních komponent. AE je perspektivní nedestruktivní metodou pro včasnou predikci a identifikaci poruch materiálu dříve než dojde k havárii sledovaných zařízení. Příspěvek analyzuje naměřená data a rozbor signálů na úrovni jednotlivých emisních událostí v průběhu creepové zkoušky mědi na základě výsledků předchozí mikrostrukturní a fraktografické analýzy jejího creepového porušení a lomu. Cílem modelové studie je přispět k úspěšné aplikaci AE pro reálné provozní komponenty energetických zařízení a tím ke zvýšení jejich provozní bezpečnosti.

### Abstract

Current acoustic emission (AE) applications are preferably oriented to continuous monitoring of machine component operation. AE is a perspective non-destructive method for early prediction and identification of material defects to avoid a disaster of running equipment. The paper analyzes the measured data and analysis of signals at the level of individual emission events during the creep test of a copper based on the results of previously performed microstructural and fractographic analyses of its creep damage evolution and fracture. The aim of the model study is to contribute to the successful application of AE for real operating components of power equipments and thus to increase their operational safety.

### Úvod

Jednou z velmi rychle se rozvíjejících metod, zařazených do skupiny nedestruktivních defektoskopických zkoušek, je technika snímání tzv. akustické emise (AE) umožňující sledování defektů s citlivostí téměř nedosažitelnou jinými metodami. Velmi významnou výhodou AE je, že se jedná o metodu integrální, která při využití vhodně rozmístěných snímačů umožňuje provádět najednou inspekci velkých a složitých konstrukcí. Metoda je založena na snímání elastického vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů objevujících se v materiálu při jeho zatěžování vnitřními nebo vnějšími silami. Technika AE umožňuje sledovat kumulaci poškození, průběh plastické deformace, iniciaci a šíření trhlin, různé fázové transformace, korozní děje apod. Proto již od roku 1985 americký The Electric Power Research Institute (EPRI) sponzoruje rozsáhlý výzkum možností použití této metodiky pro včasnou predikci a identifikaci poruch dříve, než dojde k nehodě parovodních systémů fosilních energetických zařízení [1]. I když výzkumné úsilí dospělo k přípravě návrhu normy v rámci americké normalizační komise ASTM (AE Subcommittee of E07.04) [2], je možnost získání nezbytných a žádoucích podkladů a informací k praktickému využití AE téměř nemožná.

V současné době probíhá spolupráce mezi UJP PRAHA a.s., ZD Rpety-Dakel [3], ÚTIA AV ČR, v.v.i. a Laboratoří akustické emise FSI VUT v Brně, jejímž cílem je návrh a realizace diagnostického systému a metody využívající AE pro diagnostiku a provozní monitorování poškozování vysokotlakých potrubních systémů způsobené erozně korozními procesy a vznikem

a šířením trhlin, vznikajících v důsledku creepového poškození materiálu. K tomuto účelu byly v laboratořích UJP PRAHA a.s. prováděny jednoosé tahové creepové zkoušky několika parovodních creepově odolných materiálů s různou předchozí expozicí (různě provozně exponovaná ocel 15 128, laboratorně stárnutý heterogenní svarový spoj ocelí P91 a 15Ch1M1F nebo výchozí stav oceli P92) s kontinuálním záznamem AE (zajišťuje DAKEL). Hlavním problémem provedených creepových testů byla absence ochranné atmosféry, což vedlo k oxidaci povrchu materiálu a následně vytvoření oxidické vrstvy. Vzniklo podezření, že se během záznamu AE při creepových zkouškách většina velkých píků týká spíše praskání této oxidické vrstvy než vnitřních defektů materiálu vzniklých v průběhu creepové zkoušky.

V další etapě řešení problematiky bylo proto nutné navrhnout a zrealizovat takové konstrukční řešení, které by umožnilo provádět creepové zkoušky v ochranné atmosféře, a tím zamezit šíření těchto nežádoucích šumů AE. K účasti na řešení tohoto problému byl přizván ÚFM AV ČR, v.v.i., který má rozsáhlé zkušenosti s realizací creepových zkoušek v ochranné atmosféře a disponuje relevantní zkušební infrastrukturou. Realizace řešení spočívá v úpravě creepového stroje tak, aby na zkoušený creepový vzorek (horní a spodní část hlavy vzorku) bylo možno umístit dva vlnovody pro měření AE a ty tzv. bezdotykově vyvést ven mimo creepovou pec tak, aby nedocházelo k úniku vnitřní ochranné atmosféry z pece. Dalším úkolem bylo vytvořit správnou metodiku vyhodnocování naměřených dat AE a identifikovat jednotlivé degra-dační jevy. V současné době probíhá analýza naměřených dat a snaha o hlubší analýzu signálu na úrovni jednotlivých emisních událostí. Jako zdroj pro analýzu slouží data z creepových zkoušek mědi testovaných v ochranné atmosféře, to je při použití experimentálního materiálu, který je z hlediska fyzikálního charakteru creepového porušení velmi dobře popsán a neuplatňují se u něho jiné vedlejší degra-dační mechanismy (strukturní nestabilita či tvorba a rozpouštění nových fází) v průběhu creepové expozice apod. Příspěvek přináší současné poznatky při řešení výše uvedené problematiky a navazuje na příspěvek Svobodové a kol. [3], přednesený na minulé konferenci.

### **Experimentální materiál a testovací podmínky**

Jako experimentální materiál byla zvolena měď rozdílné čistoty, ze které byly připraveny válcové creepové vzorky o průměru 5 mm a délce 50 mm. Creepové zkoušky vedené při aplikaci jednoosého tahu byly provedeny v ÚFM AV ČR, v.v.i. Brno, v režimu ochranné atmosféry argonu s konstantním zatížením 28 MPa na teplotě 500 °C. Creepové prodloužení bylo měřeno induktivním snímačem, kde výstup zesíleného analogového signálu byl poté převeden na digitální pomocí multimetru, jehož výstupní hodnoty byly registrovány sběrníci PC. Lomové plochy exponovaných vzorků byly analyzovány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu SEM-EBSD.

Akustická emise byla průběžně monitorována během creepových testů pomocí funkčního prototypu aparatury IPL-3 (18bit/15MHz) pro sběr dat, vyvinutého společností DAKEL v rámci projektu TRIO MPO č. FV 10645, se vzorkovací frekvencí 15 MHz a celkovým zesílením 100 dB. Vysoké rozlišení použitého AD převodníku spolu s velmi vysokou vzorkovací frekvencí umožňuje zachytit emisní události, které dosud byly za detekční hranicí. Měření AE bylo dosaženo pomocí dvou senzorů MDK-42AS42. Tyto senzory byly přes ultrazvukový gel magneticky přichyceny na konce kuželových tělísek sloužících jako finální výstup obou vlnovodů. Zatímco tradiční uchycení vzorku bývá v ÚFM AV ČR, v.v.i. řešeno závěsnými čelistmi, pro účely měření AE bylo zvoleno upravené konstrukční řešení. Režim uchycení vzorku byl řešen z horní strany jako závitový, ze spodní jako závěsný s otvorem v hlavě pro uchycení vlnovodu (obr. 1). Jako spodní vlnovod (kanál A) byl použit svařovací drát o průměru 2 mm z nemagnetické oceli AISI 316L Si. Tento vlnovod o délce cca 500 mm byl připevněn k hlavě vzorku (závěsný systém) a následně vyveden podél spodní tahové soustavy dolů mimo pec. Odlišné konstrukční řešení bylo zvoleno pro snímání v horní části vzorku (kanál B). Zde byla pro přenos

signálu použita upravená tahová soustava tak, že vzorek byl upnut přes závitovou hlavu přímo do horního táhla (tvořil tak jeden celek) a signál byl vyveden ven z pece přes uchycovací oko situované vně pece. Tento způsob umožnil vyhnout se komplikovanému řešení připevnění vlnovodu k pohyblivé tahové soustavě (pohyb v důsledku deformace vzorku), kdy je nutno řešit nejen utěsnění vlnovodu při výstupu z pece (únik argonu), ale i případné nežádoucí vibrace v důsledku pohybu vlnovodu. Provedená měření prokázala v obou případech dobrou detekci i přenos signálu AE.



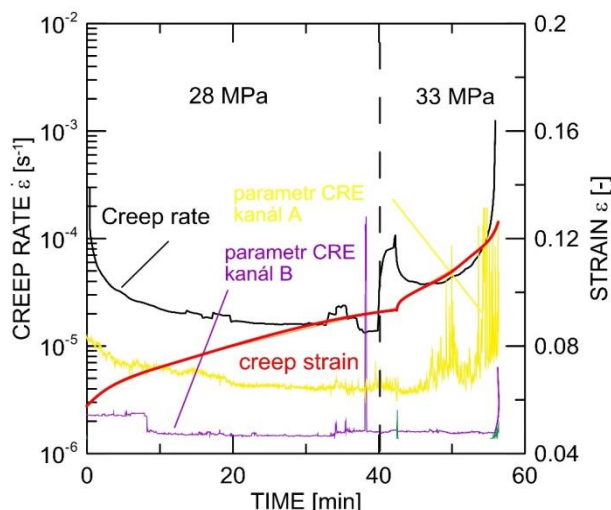
Obr. 1: Tahová sestava creepového stroje s adaptací zařízení pro měření AE

### Creepové testy s detekcí AE a mikrostrukturní analýza

Dříve, než se přistoupilo k samotné realizaci creepových zkoušek, bylo nutno provést několik přípravných měření: 1. měření šumového pozadí v laboratoři ÚFM AV ČR, v.v.i., které prokázalo jeho nízkou hladinu, 2. tahové zkoušky čisté mědi (provedené v UJP PRAHA a.s.) pro nastavení diagnostického systému AE.

Creepové chování mědi různé čistoty pak bylo testováno v ÚFM AV ČR, v.v.i. v ochranné atmosféře argonu, při teplotě 500 °C a napětí 28 MPa. V průběhu creepových zkoušek byl detekován signál AE (ukázka jedné emisní události (EU) na obr. 4), který byl následně převeden do parametru CRE (odchylka okamžité průměrné hodnoty signálu od střední hodnoty signálu), jehož grafické porovnání s časovou závislostí rychlosti creepové deformace ukazuje např. obr. 2. V tomto případě byla zkoušena čistá měď, zkouška byla po dosažení stacionárního stadia creepu přitížena o 5 MPa a test následně veden do lomu. Z grafických výsledků vyplývá (obr. 2 až obr. 4), že se podařilo lokalizovat mezi nepoužitelným šumem i řadu hitů, které zřejmě souvisí s procesy probíhajícími uvnitř creepovaného vzorku. Ihned po zatížení lze pozorovat hustou síť EU, což zřejmě souvisí s vyšší dislokační aktivitou doprovázenou vznikem mezikrystalových kavit na hranicích zrn díky významné lokální koncentraci napětí způsobené pokluzou po hranicích zrn. Obecně se nukleace kavit uskutečňuje především bezprostředně po aplikaci na-

pětí, resp. v počátečních fázích primárního creepu, kdy je rychlost creepu vysoká, méně pak v průběhu stacionárního creepu. Tím lze vysvětlit i pokles počtu EU i CRE v této fázi. K vyšší aktivitě EU i CRE znovu dochází až na počátku terciárního stadia creepu, což lze přičíst růstu a koalescenci jednotlivých kavit, a tím vytváření magistrální trhliny vedoucí k lomu.

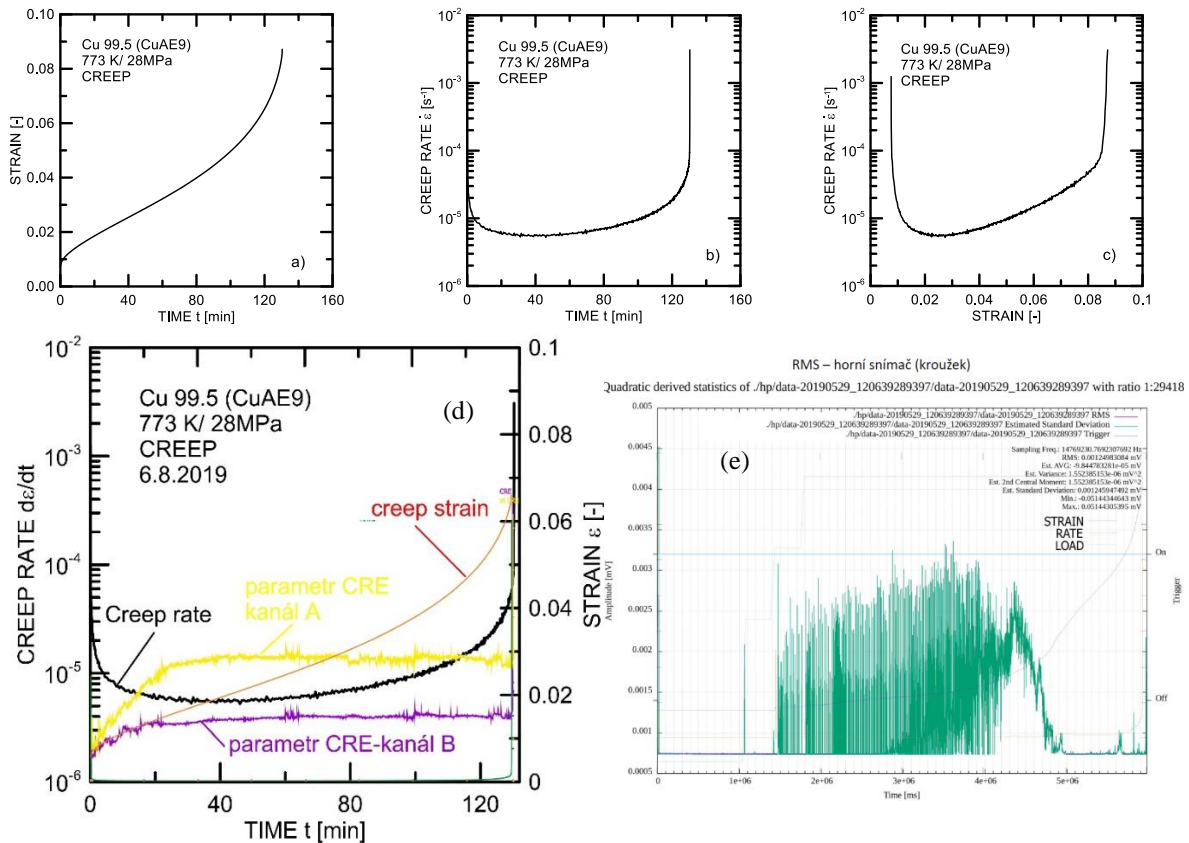


Obr. 2: Závislost creepové rychlosti, deformace a parametrů CRE [ $\mu\text{V}$ ] na čase

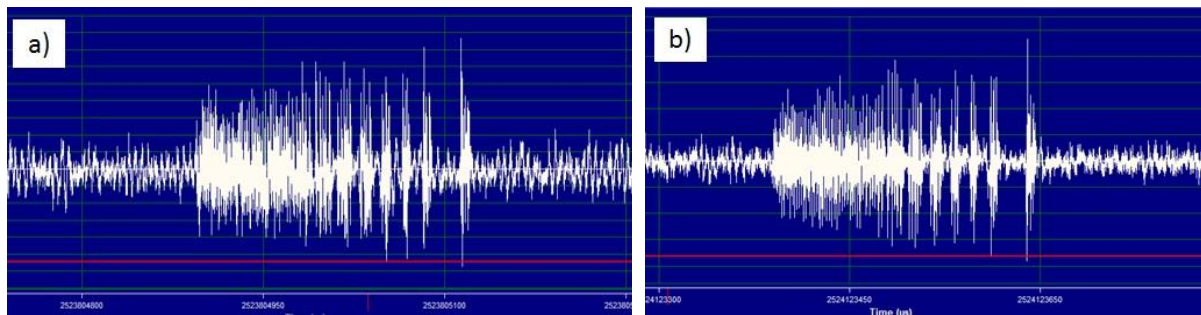
Standardní creepovou závislost creepové deformace mědi s pouze technickou čistotou (Cu 99,5), kde se dá předpokládat vyšší nukleace kavit v důsledku přítomnosti nečistot ve studovaném materiálu, na čase znázorňuje obr. 3a. Z důvodu predikce životnosti je důležité určení místa konce stacionárního a nástupu terciárního stadia creepu, což je stadium, od kterého nastává významný proces fyzikálně metalurgických změn v materiálu. Tento stav lze lépe znázornit transformací těchto standardních křivek ve formě okamžité rychlosti deformace  $\dot{\epsilon}$  na čase  $t$  (obr. 3b) nebo okamžité rychlosti deformace  $\dot{\epsilon}$  na creepové deformaci  $\epsilon$  (obr. 3c). Je zřejmé, že ani jedna křivka nevykazuje přesně definovanou stacionární fázi tečení. Vždy je však možno najít inflexní bod, který odpovídá určité minimální rychlosti creepu. Z uvedených závislostí je zřejmé, že po počátečním zpevnění charakterizovaném primárním stadiem creepu zvolna dochází ke krátkému stacionárnímu stavu a následnému odpevnění v podobě terciárního stadia. Toto stadium zde představuje dominantní část celé creepové expozice tohoto materiálu. V úplném závěru dochází k akceleraci creepové rychlosti a závěrečnému lomu.

Pro lepší ilustraci intenzity EU v průběhu creepu je v obr. 3 vedle hodnoty parametru CRE (obr. 3d) vynesena také efektivní hodnota signálu RMS (odmocnina průměru čtverců, obr. 3e). Z uvedených závislostí je zřejmé, že v porovnání s čistým materiálem byly detekovány EU rovnoměrně v celém průběhu creepové expozice. To lze přičíst vyšší aktivitě nukleace a koalescence kavit vlivem nižší čistoty materiálu.

Každá EU je v detailním rozlišení charakteristická svým specifickým tvarem modulace signálu. Nicméně, síla a modulace signálu je závislá nejen na délce vlnovodu, ale i na jeho tvaru, počtu přechodů apod. Bylo proto sledováno, zda nedochází ke zkreslení signálu z jednotlivých kanálů. V průběhu snímání AE jsme dosáhli podobných výsledků z obou snímačů. Detailní analýza vybraných emisních píků prokázala totožné zachycení emisní události lišící se nepatrně pouze silou signálu (obr. 4). Navíc je možno rozlišit různé typy EU.



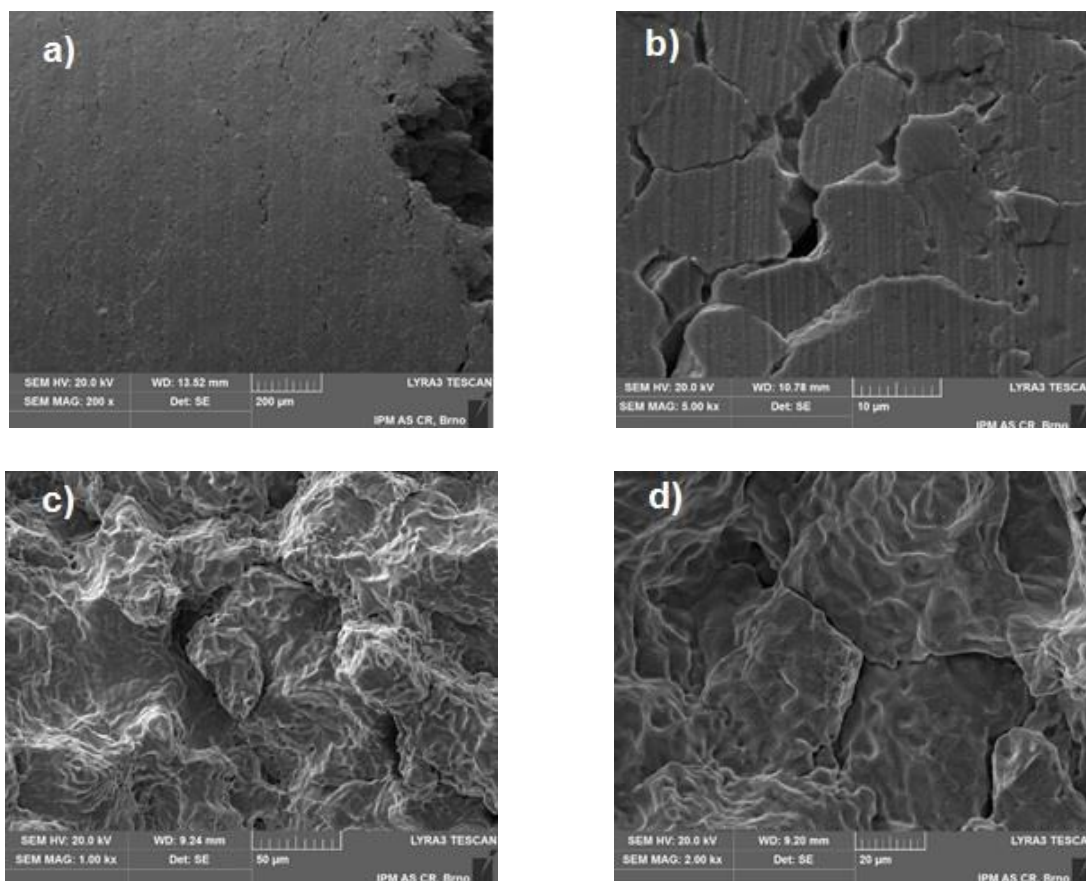
Obr. 3: Creepové charakteristiky Cu 99,5 při napětí 28 MPa a teplotě 500 °C: a) creepová deformace vs. čas, b) creepová rychlost vs. čas, c) creepová rychlost vs. deformace, d) srovnání parametru CRE se zakreslením parametru creepové rychlosti a deformace, e) ukázka RMS (vzorek CuAE3)



Obr. 4: Srovnání signálu AE z a) horního a b) dolního kanálu (stejná emisní událost)

Pro ověření strukturních změn probíhajících v materiálu vlivem creepového zatěžování byla provedena analýza lomové plochy. Fraktografické vyšetření creepové lomové plochy technicky čisté mědi (obr. 5) prokázalo výskyt kavit, jejichž kumulace vedla až k vytvoření magistrální trhliny. K závěrečnému lomu tak dochází v důsledku lokální ztráty plastické stability matrice mechanismem mezikrystalového lomu.





Obr. 5: Creepová lomová plocha technicky čisté mědi: a,b) podélný pohled, c,d) detail do-lomové oblasti

## Závěr

Dosažené výsledky jsou příslibem do budoucna z hlediska aplikace na reálné materiály pro energetický průmysl, kdy další fáze výzkumu bude zaměřena na studium výchozích a provozně degradovaných ocelí 15 128.

## Poděkování

Výzkumný program byl realizován za finanční podpory TA ČR v rámci projektu TN01000015 – NCK Strojírenství a MPO ČR v rámci projektu FV10645.

## Literatura

- [1] Rodgers, J. M. (2007): *Acoustic emission testing of seam-welded high energy piping systems in fossil power plant*. Journal of Acoustic Emission, Vol. 25, pp. 286-293. ISSN 0730-0050
- [2] Rodgers, J. M., Tilley, R. (2004): Standardization of acoustic emission testing of fossil power plant seam-welded high energy piping. *ASME Pressure Vessels & Piping Conference*, ASME, San Diego, USA, PVP-Vol. 47, str. 113-131. ISBN 0-7918-4681-4
- [3] Koula, V. a kol. (2018): *Analyzátor kontinuální akustické emise pro diagnostiku erozně korozního a creepového poškození potrubních systémů*. Roční zpráva o řešení projektu, rok 2018, program TRIO MPO, č. FV 10645, DAKEL, Praha.
- [4] Svobodová, M., Chmela, T., Čmakal, J., Slunečko, T., Koula, V. (2018): Využití akustické emise pro diagnostiku creepového poškození parovodních systémů, *Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 65-68. ISBN 978-80-261-0794-1