

**Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.  
ČVUT v Praze, Fakulta strojní  
ČEZ, a. s.  
ZČU v Plzni, Fakulta strojní, RTI  
ÚJV Řež, a. s.  
Inženýrská akademie České republiky  
ČSNMT**

**ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT  
ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ  
V ELEKTRÁRNÁCH**

Srní  
16. – 18. říjen 2018

Kolektiv autorů

Sborník z 13. konference

**„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“**

Srní, 16. – 18. říjen 2018

ISBN 978-80-261-0794-1

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2018

## **ODBORNÍ GARANTI**

Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR  
Dr. Ing. Pavel Polach – VZÚ Plzeň

## **PROGRAMOVÝ VÝBOR**

Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR  
Dr. Ing. Pavel Polach – VZÚ Plzeň  
Ing. Václav Liška, CSc. – VZLÚ, a.s.  
Prof. Ing. František Hrdlička, CSc. – ČVUT v Praze, FS  
Mgr. Aleš Laciok, MBA – ČEZ, a. s.  
Ing. Radovan Šťastný – ČEZ, a. s.  
Ing. Jan Zdebor, CSc. – ZČU v Plzni, FS  
Ing. Martin Kronďák, Ph.D. – ÚJV Řež a. s.

## **ORGANIZAČNÍ VÝBOR**

Jana Miksanová – VZÚ Plzeň  
Lenka Lopatková – VZÚ Plzeň

## GENERÁLNÍ PARTNEŘI



ÚJV Řež, a. s.

## HLAVNÍ PARTNEŘI







**RAP** s.r.o.  
**eo**



**MEDIÁLNÍ PARTNEŘI**

all-for **power**

**ENERGETIKA**



## ODBORNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE

### ÚTERÝ 16. 10. 2018:

#### 1. ODPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Diagnostika stavu konstrukčních prvků energetických zařízení*

Garant: Ing. Jan Zdebor, CSc.

#### 2. ODPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika parních turbín*

Garant: Dr. Ing. Pavel Polach

### STŘEDA 17. 10. 2018

#### 1. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů*

Garant: Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D.Eng.h.c., FEng.

#### 2. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika primárního okruhu jaderných elektráren*

Garant: Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

### ČTVRTEK 18. 10. 2018

#### 1. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika oběžných lopatek parních trubín a teplotního namáhání energetických konstrukcí*

Garant: Ing. Radovan Štastný

#### 2. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

*Materiálové vlastnosti konstrukčních prvků*

Garant: Ing. Václav Liška, CSc.

## PŘEDMLUVA

Vážené dámy, vážení pánové, již po třinácté se společně setkáváme na konferenci zaměřené na zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Z rekordního počtu přihlášených příspěvků v letošním ročníku je zřejmý neutuchající zájem o tuto problematiku. Z přijatých abstraktů bylo vybráno do programu konference 43 odborných příspěvků, které byly rozděleny do šesti prezentačních bloků.

Úvodní část konference je zaměřena na diagnostiku stavu konstrukčních prvků energetických zařízení a problematiku parních turbín. Během druhého dne následují prezentační bloky pokrývající problematiku degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů a oblast primárního okruhu jaderných elektráren. Závěr konference je věnován problematice teplotního namáhání energetických konstrukcí, oblasti lopatek parních turbín a materiálovým vlastnostem konstrukčních prvků.

Dovolte mi jménem organizačního týmu a programového výboru konference poděkovat všem partnerům, kteří výrazně přispěli ke konání tohoto ročníku a Vám popřát, aby i letošní, již tradiční, konference v Srní byla pro Vás odborně i společensky přínosná a obohacující.

Stanislav Martínek

# PROGRAM KONFERENCE

**Úterý, 16. října**

Registrace účastníků v hotelu Srní u recepce, 8.00 – 18.00

Oběd v hotelu Srní, 11.15 – 12.15

**Zahájení konference** (sál v hotelu Šumava), 12.30

12.30 – 13.00 Úvod a zahájení konference  
Liška V., Zuna P., Jiříčka D., Martínek S.

Zuna P.  
13.00 – 13.15 Úvodní slovo pana Zuny.

**1. odpolední blok přednášek – Jan Zdebor (ZČU v Plzni, FS), 13.15 – 15.30**

Žďárek J.  
13.15 – 13.30 Stav projektu IVMR HORIZON 2020 - Experiment pro potvrzení IVMR pro VVER 1000

Kondás J.  
13.30 – 13.45 Pokročilá technologie vysokotlaký Cold Spray a její využití v energetice: princip, vhodné povlaky a vybrané aplikace

Slováček M.  
13.45 – 14.00 Virtuální numerické simulace jako podpora návrhu, výroby a provozu energetických zařízení

Konop R.  
14.00 – 14.15 Odběr vzorků návaru z vnitřního povrchu TNR 3. bloku JE Dukovany pro hodnocení radiačního poškození

Brom J.  
14.15 – 14.30 Vývoj perspektivních nedestruktivních metod

Vajdák M.  
14.30 – 14.45 Moderní diagnostika pro monitorování deformací vysokoteplotních komponent za provozu

Vít J.  
14.45 – 15.00 Defektoskopie nebo Defektometrie?

Ernestová M.  
15.00 – 15.15 Hodnocení poškození chladících kroužků z dieselgenerátoru 6ZL40/48 na JE Dukovany

**Diskuse k předneseným příspěvkům, 15.15 – 15.30**

Občerstvení, 15.30 – 15.40

**2. odpolední blok přednášek – Pavel Polach (VZÚ Plzeň), 15.40 – 17.30**

15.40 – 16.00 Prezentace společnosti EUTIT s.r.o.

Smolík L.  
16.00 – 16.15 Komplexní výpočtové modelování kluzných ložisek s naklápěcími segmenty

Liška J.  
16.15 – 16.30 Diagnostika torzních vibrací rotoru turbogenerátoru

Synáč J.  
16.30 – 16.45 Poslední nízkotlaké stupně parních turbín s transsonickým a supersonickým proudem páry

Mareček O.  
16.45 – 17.00 Monitorování částečných výbojů ve statorovém vinutí synchronních generátorů

Ságl P.  
17.00 – 17.15 Hodnocení provozní spolehlivosti z pohledu primárních dat

**Diskuse k předneseným příspěvkům, 17.15 – 17.30**

Slavnostní večeře v hotelu Srní, 18.30

## Středa, 17. října

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

### 1. dopolední blok přednášek – Petr Zuna (ČVUT v Praze, FS, IA ČR), 8.30 – 11.00

Jiříček I. 8.30 – 8.45	Nová definice korozních rizik pro turbínu a její diagnostiku
Pazderová M. 8.45 – 9.00	Vývoj mořících inhibitorů snižujících nebezpečí vodíkové křehkosti
Tonarová D. 9.00 – 9.15	Hodnocení korozního napadení homogenního svarového spoje austenitické trubky a příruby
Adamech M. 9.15 – 9.30	Metalografické overenie a meranie distribucie bóru v oceli ATABOR a v oblasti jej zvarových spojov
Svobodová M. 9.30 – 9.45	Využití akustické emise pro diagnostiku creepového poškození parovodních systémů
Kronďák M. 9.45 – 10.00	Evropské přístupy k řízení stárnutí skrytých potrubí
Petelová P. 10.00 – 10.15	Vývoj procesu regeneračního žhání vnitřních částí reaktoru VVER-440 pro zajištění dlouhodobého provozu
Polcar P. 10.15 – 10.30	Identifikace materiálových vlastností konstrukčních ocelí s využitím umělé inteligence
Hledík J. 10.30 – 10.45	Podpora dlouhodobého provozu JE v ČR ve světle zkušeností z průběhu přípravy a licencování EDU pro LTO

### Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.45 – 11.00

Občerstvení, 11.00 – 11.10

### 2. dopolední blok přednášek – Václav Mentl (ZČU v Plzni, FS), 11.10 – 13.25

11.10 – 11.30	Prezentace společnosti PAPco s.r.o.
Chvostová E. 11.30 – 11.45	Stanovení únavových a tahových vlastností pomocí miniaturizovaných těles a DIC metody
Veselá J. 11.45 – 12.00	Zkušenosti z výroby a ověřování zkušebních těles heterogenních svarových spojů nátrubků N6 a N7 parogenerátorů jaderné elektrárny Temelín
Ertl J. 12.00 – 12.15	Postup hodnocení fluencí rychlých neutronů dopadajících na TNR JE Dukovany
Fleischhans J. 12.15 – 12.30	Metodika a výsledky predikce prodlužování životnosti detektorů neutronů
Ducháček P. 12.30 – 12.45	Orbitální svařování heterogenních svarových spojů ocelí 12022.1 a 08Ch18N10T přidavným materiálem typu Sv-07Ch25N13
Palán M. 12.45 – 13.00	Oprava heterogenního svarového spoje parního generátoru č.25 na JE Dukovany technologií Weld Overlay
Balák M. 13.00 – 13.15	Teplotné starnutie a jeho monitorovanie v JE na Slovensku

### Diskuse k předneseným příspěvkům, 13.15 – 13.25

Oběd v hotelu Srní, 13.30 – 14.30

Večeře, společenský večer v sále hotelu Srní  
(bowlingový turnaj o pohár ředitele společnosti VZÚ Plzeň) – od 18.30

## Čtvrtek, 18. října

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

### 1. dopolední blok přednášek – Radovan Šťastný (ČEZ, a.s.), 8.30 – 10.45

Veselý S. 8.30 – 8.45	Analýza teplotních napětí plamence spalovací komory a predikce životnosti
Horváth J. 8.45 – 9.00	Dopad vysokoteplotního přehřátí na mikrostrukturní změny degradované ocele SUPER 304H
Lukáš J. 9.00 – 9.15	Výzkum pro umožnění bezpečného provozu parovodů s makrotrhlinami
Kobzová A. 9.15 – 9.30	Stabilizace cirkulačních chladících vod na EDU
Kasl J. 9.30 – 9.45	VaV projekt: Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI, Hodnocení korozních důlků oběžných lopatek NT dílů parních turbín
Habrčel V. 9.45 – 10.00	VaV projekt: Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI, etapa M1 a M2
Kobzová A. 10.00 – 10.15	VaV projekt: Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI, etapa M5 - Chemické režimy a nánosy
Polach P. 10.15 – 10.30	Energetické centrum kompetence

### Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.30 – 10.45

Občerstvení, 10.45 – 11.00

### 2. dopolední blok přednášek – Václav Liška (VZLÚ Praha), 11.00 – 12.55

Horváth L. 11.00 – 11.15	Příklad nízké vypovídací schopnosti projektových parametrů VT parovodů pro plánování prodloužení životnosti jejich komponent
Junek M. 11.15 – 11.30	Vliv krátkodobého degradačního žíhání oceli P92 na změnu mechanických vlastností z hlediska precipitace Lavesovy fáze
Neumannová Š. 11.30 – 11.45	Žárupevné vlastnosti martenzitické ocele CB2 v základním stavu a po svaření
Mlnářik J. 11.45 – 12.00	Návrh zařízení pro měření hloubky trhlin střídavou potenciálovou metodou
Černý M. 12.00 – 12.15	Životnost lopatek parních turbín
Marková J. 12.15 – 12.30	Optimalizace údržby ochranných nátěrů průmyslových komínů a chladících věží
Brabec P. 12.30 – 12.45	Využití metalografických replik při nedestruktivní identifikaci materiálu chladících kroužků pro dieselgenerátory JE Dukovany

### Diskuse k předneseným příspěvkům a ukončení konference, 12.45 – 12.55

Oběd v hotelu Srní, 13.00 – 14.00

# OBSAH

<b>ODBORNÍ GARANTI .....</b>	<b>III</b>
<b>PROGRAMOVÝ VÝBOR .....</b>	<b>III</b>
<b>ORGANIZAČNÍ VÝBOR .....</b>	<b>III</b>
<b>GENERÁLNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>IV</b>
<b>HLAVNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>IV</b>
<b>MEDIÁLNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>V</b>
<b>ODBORNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE .....</b>	<b>VII</b>
<b>PŘEDMLUVA .....</b>	<b>VIII</b>
<b>PROGRAM KONFERENCE .....</b>	<b>IX</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>XII</b>
<b>STAV PROJEKTU IVMR HORIZON 2020 – EXPERIMENT PRO POTVRZENÍ IVMR PRO VVER 1000 .....</b>	<b>1</b>
<b>PRESENT STATUS IVMR HORIZON 2020 PROJECT – TESTS FOR THE IVMR CONFIRMATION FOR VVER 1000 .....</b>	<b>1</b>
<b>JIŘÍ ŽDÁREK, JAN WANDROL, VLADISLAV KRHOUNEK, DAVID BÁTĚK A MAREK BENČÍK .....</b>	<b>1</b>
<b>VIRTUÁLNÍ NUMERICKÉ SIMULACE JAKO PODPORA NÁVRHU, VÝROBY A PROVOZU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>5</b>
<b>VIRTUAL NUMERICAL SIMULATION AS SUPPORT OF DESIGN, MANUFACTURING AND OPERATION OF ENERGETIC FACILITY .....</b>	<b>5</b>
<b>MAREK SLOVÁČEK .....</b>	<b>5</b>
<b>ODBĚR VZORKŮ NÁVARU Z VNITŘNÍHO POVRCHU TNR 3. BLOKU JE DUKOVANY PRO HODNOCENÍ RADIAČNÍHO POŠKOZENÍ .....</b>	<b>11</b>
<b>SAMPLING OF REACTOR PRESSURE VESSEL INNER CLADDING FOR RADIATION DAMAGE EVALUATION OF DUKOVANY NPP UNIT 3 .....</b>	<b>11</b>
<b>RADEK KONOP A PETR ŠMOLÍK .....</b>	<b>11</b>
<b>VÝVOJ PERSPEKTIVNÍCH NEDESTRUKTIVNÍCH METOD .....</b>	<b>15</b>
<b>DEVELOPMENT OF PERSPECTIVE NONDESTRUCTIVE METHODS .....</b>	<b>15</b>
<b>JAROSLAV BROM A PAVEL MAREŠ .....</b>	<b>15</b>
<b>MODERNÍ DIAGNOSTIKA PRO MONITOROVÁNÍ DEFORMACÍ VYSOKOTEPLTNÍCH KOMPONENT ZA PROVOZU .....</b>	<b>19</b>
<b>MODERN DIAGNOSTICS FOR MONITORING DEFORMATION OF HIGH-TEMPERATURE COMPONENTS IN OPERATION .....</b>	<b>19</b>
<b>MICHAL VAJDÁK, KATEŘINA BONAVENTUROVÁ A PAVEL URBAN .....</b>	<b>19</b>
<b>DEFEKTOSKOPIE NEBO DEFEKTOMETRIE? .....</b>	<b>23</b>
<b>DEFECTOSCOPY OR DEFECTOMETRY? .....</b>	<b>23</b>
<b>JAN VÍT, LUKÁŠ STAINER A ZDENĚK SKÁLA .....</b>	<b>23</b>
<b>HODNOCENÍ POŠKOZENÍ CHLADÍCÍCH KROUŽKŮ DIESELGENERÁTORU 6ZL40/48 NA JE DUKOVANY .....</b>	<b>27</b>
<b>DAMAGE ASSESMENT OF THE COOLING INSERTS OF DIESELGENERATOR 6ZL40/48 AT NPP DUKOVANY .....</b>	<b>27</b>
<b>MIROSLAVA ERNESTOVÁ, MIROSLAV KRPEC, PETR BRABEC, DANA TONAROVÁ A ZDENĚK ČANČURA .....</b>	<b>27</b>
<b>KOMPLEXNÍ VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ KLUZNÝCH LOŽISEK S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY .....</b>	<b>31</b>
<b>ADVANCED COMPUTATIONAL MODELLING OF TILTING PAD JOURNAL BEARINGS .....</b>	<b>31</b>



LUBOŠ SMOLÍK, VÁCLAV HOUDEK A JAN HYRÁT .....	31
<b>DIAGNOSTIKA TORZNÍCH VIBRACÍ ROTORU TURBOGENERÁTORU .....</b>	<b>35</b>
<b>DIAGNOSTICS OF TURBOGENERATOR ROTOR TORSIONAL VIBRATION .....</b>	<b>35</b>
JINDŘICH LIŠKA, SVEN KÜNKELE A JAN JAKL .....	35
<b>POSLEDNÍ NÍZKOTLAKOVÉ STUPNĚ PARNÍCH TURBÍN S TRANSSONICKÝM A SUPERSONICKÝM PROUDEM PÁRY .....</b>	<b>39</b>
<b>TRANSONIC AND SUPERSONIC STEAM FLOW OF THE LAST TURBINE STAGES.....</b>	<b>39</b>
JAROSLAV SYNÁČ .....	39
<b>MONITOROVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ VE STATOROVÉM VINUTÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ .....</b>	<b>43</b>
<b>PARTIAL DISCHARGE MONITORING OF SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR WINDING .....</b>	<b>43</b>
OTO MAREČEK, MILOŠ KAŠKA A MILAN KASÁRNÍK .....	43
<b>HODNOCENÍ PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI Z POHLEDU PRIMÁRNÍCH DAT .....</b>	<b>47</b>
<b>EVALUATION OF THE OPERATIONAL DATA FROM THE PRIMARY DATA POINT OF VIEW .....</b>	<b>47</b>
JAN KAMENICKÝ, PAVEL SÁGL A JAROSLAV ZAJÍČEK .....	47
<b>NOVÁ DEFINICE KOROZNÍCH RIZIK PRO TURBÍNU A JEJÍ DIAGNOSTIKU .....</b>	<b>51</b>
<b>NEW DEFINITION OF CORROSION RISK ASSESSMENT FOR TURBINE AND ITS DIAGNOSIS .....</b>	<b>51</b>
IVO JIŘÍČEK .....	51
<b>VÝVOJ MOŘÍCÍCH INHIBITORŮ SNIŽUJÍCÍCH NEBEZPEČÍ VODÍKOVÉ KŘEHKOSTI .....</b>	<b>53</b>
<b>DEVELOPMENT OF PICKLING INHIBITORS LOWERING DANGER OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT.....</b>	<b>53</b>
MARTINA PAZDEROVÁ, PETR SZELAG A ALENA FALTÝNKOVÁ .....	53
<b>HODNOCENÍ KOROZNÍHO NAPADENÍ HOMOGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE AUSTENITICKÉ TRUBKY A PŘÍRUBY .....</b>	<b>57</b>
<b>CORROSION ATTACK EVALUATION OF HOMOGENEOUS WELD JOINT OF AUSTENITIC TUBE AND FLANGE .....</b>	<b>57</b>
DANA TONAROVÁ, PETR BRABEC A JAROSLAV BURDA .....	57
<b>METALLOGRAFICKÉ OVERENIE A MERANIE DISTRIBÚCIE BÓRU V OCELI ATABOR A V OBLASTI JEJ ZVAROVÝCH SPOJOV .....</b>	<b>61</b>
<b>METALLOGRAPHIC VERIFICATION AND MEASUREMENT OF BORON DISTRIBUTION IN ATABOR STEEL AND ITS WELD JOINTS.....</b>	<b>61</b>
MAREK ADAMECH, MARTIN BŘEZINA, JANA PETZOVÁ A MILOŠ BALÁK .....	61
<b>VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE PRO DIAGNOSTIKU CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ PAROVODNÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>65</b>
<b>ACOUSTIC EMISSION AS A METHOD FOR DIAGNOSTICS OF CREEP DAMAGE OF STEAM PIPING SYSTEMS .....</b>	<b>65</b>
MARIE SVOBODOVÁ, TOMÁŠ CHMELA, JOSEF ČMAKAL, TOMÁŠ SLUNÉČKO A VÁCLAV KOULA.....	65
<b>EVROPSKÉ PŘÍSTUPY K ŘÍZENÍ STÁRNUTÍ SKRYTÝCH POTRUBÍ .....</b>	<b>69</b>
<b>EUROPEAN APPROACH TO LIFE TIME MANAGEMENT OF CONCEALED PIPEWORK .....</b>	<b>69</b>
MARTIN KRONĎÁK .....	69
<b>VÝVOJ PROCESU REGENERAČNÍHO ŽIHÁNÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER-440 PRO ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU .....</b>	<b>71</b>
<b>DEVELOPMENT OF THERMAL ANNEALING PROCESS OF WWER-440 INTERNALS FOR PROVIDING A LONG-TERM OPERATION .....</b>	<b>71</b>
PETRA PETELOVÁ, BARBORA MAREŠOVÁ, ONDŘEJ BURŠÍK, RADIM KOPŘIVA A ALEŠ MATERNA .....	71

<b>IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ S VYUŽITÍM UMĚLÉ INTELIGENCE.....</b>	<b>75</b>
<b>IDENTIFICATION OF MATERIAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS WITH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....</b>	<b>75</b>
PETR POLCAR, LADISLAV KANDER, JAN LAZAR A PETR KINDELMANN .....	75
<b>STANOVENÍ ÚNAVOVÝCH A TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ POMOCÍ MINIATURIZOVANÝCH TĚLES A DIC METODY</b>	<b>79</b>
<b>DETERMINATION OF FATIGUE AND TENSION PROPERTIES BY USING SUB-SIZED SPECIMENS AND DIC METHOD</b>	<b>79</b>
.....	
EVA CHVOSTOVÁ, JÁN DŽUGAN A PAVEL KONOPÍK .....	79
<b>ZKUŠENOSTI Z VÝROBY A OVĚŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ NÁTRUBKŮ N6 A N7 PAROGENERÁTORŮ JE TEMELÍN</b>	<b>83</b>
<b>THE EXPERIENCE OF PRODUCING AND VERIFYING THE TEST PIECES OF THE HETEROGENEOUS WELDING JOINTS OF THE NOZZLES N6 AND N7 OF THE STEAM GENERATOR OF THE NUCLEAR POWER STATION TEMELÍN</b>	<b>83</b>
.....	
JANA VESELÁ A PAVEL MAREŠ .....	83
<b>POSTUP HODNOCENÍ FLUENCÍ RYCHLÝCH NEUTRONŮ DOPADAJÍCÍCH NA TNR JE DUKOVANY</b>	<b>87</b>
<b>ASSESSMENT OF NEUTRON FLUENCE AFFECTING RPV IN DUKOVANY NPP</b>	<b>87</b>
.....	
JAKUB ERTL.....	87
<b>PREDIKCE PRODLUŽENÍ ŽIVOTNOSTI DETEKTORŮ NEUTRONŮ</b>	<b>91</b>
<b>NEUTRON DETECTORS LIFETIME EXTENSION AND PROGNOSSES</b>	<b>91</b>
.....	
JIŘÍ FLEISCHHANS, PETR KOS A JAN ŠVEHLA.....	91
<b>ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ OCELÍ 12022.1 A 08CH18N10T PŘÍDAVNÝM MATERIÁLEM TYPU SV-07CH25N13</b>	<b>95</b>
<b>ORBITAL WELDING OF DISSIMILAR WELD JOINTS OF STEELS 12022.1 AND 08CH18N10T WITH FILLER MATERIAL SV-07CH25N13</b>	<b>95</b>
.....	
PETR DUCHÁČEK, MAREK PALÁN A ZDENĚK ČANČURA .....	95
<b>OPRAVA HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE PARNÍHO GENERÁTORU Č. 25 NA JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY TECHNOLOGIÍ WELD OVERLAY</b>	<b>99</b>
<b>REPAIR OF DISSIMILAR METAL WELD JOINT OF STEAM GENERATOR N° 25 AT THE NUCLEAR POWER PLANT WITH WELD OVERLAY TECHNOLOGY</b>	<b>99</b>
.....	
MAREK PALÁN, PETR DUCHÁČEK A ZDENĚK ČANČURA .....	99
<b>TEPLOTNÉ STARNUTIE A JEHO MONITOROVANIE V JE NA SLOVENSKU</b>	<b>103</b>
<b>THERMAL AGEING MONITORING IN SLOVAK NPPS</b>	<b>103</b>
.....	
MILOŠ BALÁK, JANA PETZOVÁ A MAREK ADAMECH.....	103
<b>ANALÝZA TEPLONÍCH NAPĚTÍ PLAMENCE SPALOVACÍ KOMORY A PREDIKCE ŽIVOTNOSTI</b>	<b>107</b>
<b>ANALYSIS OF THERMAL STRESSES OF THE FLAME TUBE OF THE COMBUSTION CHAMBER AND LIFETIME PREDICTION</b>	<b>107</b>
.....	
STANISLAV VESELÝ.....	107
<b>DOPAD VYSOKOTEPLONÍHO PŘEHŘÁTÍ NA MIKROSTURUTURNÍ ZMĚNY DEGRADOVANÉ OCELE SUPER 304H</b>	<b>111</b>
<b>MICROSTRUCTURE CHANGES CAUSED BY HIGH TEMPERATURE OVERHEATING OF DEGRADED STEEL SUPER 304H</b>	<b>111</b>
.....	
JAKUB HORVÁTH, MICHAL JUNEK, MARIE ROHLOVÁ A JIŘÍ JANOVEC.....	111

<b>VÝZKUM PRO UMOŽNĚNÍ BEZPEČNÉHO PROVOZU PAROVODŮ S MAKROTRHLINAMI .....</b>	<b>115</b>
<b>RESEARCH FOR SAFE OPERATION OF STEAM PIPELINES WITH DETECTED MAKROCRACKS .....</b>	<b>115</b>
JIŘÍ LUKÁŠ .....	115
<b>STABILIZACE CIRKULAČNÍCH CHLADÍCÍCH VOD NA EDU .....</b>	<b>121</b>
<b>STABILIZATION OF OPEN COOLING WATER SYSTEM IN NPP DUKOVANY.....</b>	<b>121</b>
ALENA KOBZOVÁ.....	121
<b>PROJEKT VAV ČEZ, A.S. „TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI“ – HODNOCENÍ KOROZNÍCH DŮLKŮ OBĚŽNÝCH LOPATEK NT DÍLŮ PARNÍCH TURBÍN .....</b>	<b>125</b>
<b>PROJECT OF R&amp;D OF ČEZ A.S. „TURBINES – THE DEVELOPMENT OF A STEAM TURBINE BLADES CHECKING USING EPRI INFORMATION“ – EVALUATION OF CORROSION PITS OF ROTATING BLADES OF LP PARTS OF STEAM TURBINES.....</b>	<b>125</b>
JOSEF KASL, JAROSLAV VÁCLAVÍK, MATYÁŠ NOVÁK, JAKUB MRŠTÍK A MIROSLAVA MATĚJOVÁ .....	125
<b>VAV PROJEKT: TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI, ETAPA M1 A M2 .....</b>	<b>129</b>
<b>R&amp;D PROJECT: TURBINES – DEVELOPMENT OF BLADE CONTROL METHODOLOGY USING EPRI INFORMATION, M1 AND M2 STAGES .....</b>	<b>129</b>
VLASTIMIL HABRČETL, PAVEL MAREŠ, PAVEL ZAHŘÁDKA A JAN PATERA .....	129
<b>V&amp;V PROJEKT: TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI,.....</b>	<b>133</b>
<b>ETAPA M5 – CHEMICKÉ REŽIMY A NÁNOSY.....</b>	<b>133</b>
<b>R&amp;D PROJECT: TURBINES – DEVELOPMENT OF PROCEDURES FOR BLADE DEGRADATION MANAGEMENT BY USING EPRI GUIDELINES .....</b>	<b>133</b>
<b>WP M5 – WATER CHEMISTRY AND DEPOSITS.....</b>	<b>133</b>
ALENA KOBZOVÁ A MARTIN KRONĎÁK.....	133
<b>ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU II .....</b>	<b>137</b>
<b>ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING II.....</b>	<b>137</b>
PAVEL POLACH, JOSEF ČERNÝ A ŠÁRKA HOUDKOVÁ .....	137
<b>PŘÍKLAD NÍZKÉ VYPOVÍDACÍ SCHOPNOSTI PROJEKTOVÝCH PARAMETRŮ VT PAROVODŮ PRO PLÁNOVÁNÍ PRODLUŽOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI JEJICH KOMPONENT .....</b>	<b>143</b>
<b>EXAMPLE OF LOW INFORMATION CAPABILITY OF PROJECTED PARAMETERS FOR LIFETIME EXTENSION OF HIGH PRESSURE VESSELS .....</b>	<b>143</b>
LADISLAV HORVÁTH, JAKUB HORVÁTH, MARTIN SMEJKAL A MARIE ROHLOVÁ.....	143
<b>VLIV KRÁTKODOBÉHO DEGRADAČNÍHO ŽIHÁNÍ OCELI P92 NA ZMĚNU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ Z HLEDISKA PRECIPITACE LAVESOVY FÁZE .....</b>	<b>147</b>
<b>INFLUENCE OF SHORT-TERM AGEING AND PRECIPITATION OF LAVES PHASE ON MECHANICAL PROPERTIES OF P92 STEEL .....</b>	<b>147</b>
MICHAL JUNEK, MARIE SVOBODOVÁ A JIŘÍ JANOVEC .....	147
<b>ŽÁRUPEVNÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÉ OCELE CB2 V ZÁKLADNÍM STAVU A PO SVAŘENÍ .....</b>	<b>151</b>
<b>HIGH TEMPERATURE PROPERTIES OF STEEL CB2 IN BASIC CONDITION AND AFTER WELDING .....</b>	<b>151</b>
ŠÁRKA NEUMANNOVÁ, TOMÁŠ VLASÁK, JAN HAKL, JAN ČECH A LIBUŠE HAVELKOVÁ .....	151
<b>NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ HLOUBKY TRHLIN STŘÍDAVOU POTENCIÁLOVOU METODOU .....</b>	<b>155</b>
<b>DESIGNING OF A DEVICE FOR CRACK DEPTH MEASURING USING ACPD METHOD .....</b>	<b>155</b>

JAKUB MLNAŘÍK, PETR CHUCHVALEC A JAN KEC.....	155
<b>ŽIVOTNOST LOPATEK PARNÍCH TURBÍN .....</b>	<b>159</b>
<b>BLADES LIFETIME OF STEAM TURBINES.....</b>	<b>159</b>
MIROSLAV J. ČERNÝ .....	159
<b>OPTIMALIZACE ÚDRŽBY OCHRANNÝCH NÁTĚRŮ PRŮMYSLOVÝCH KOMÍNŮ A CHLADÍCÍCH VĚŽÍ.....</b>	<b>163</b>
<b>OPTIMIZING MAINTENANCE OF PROTECTIVE COATINGS OF INDUSTRIAL CHIMNEYS AND COOLING TOWERS .....</b>	<b>163</b>
JANA MARKOVÁ, JAN MLČOCH, MIROSLAV SÝKORA, KAMIL PREŠL A JAN MOLNÁR .....	163
<b>VYUŽITÍ METALOGRAFICKÝCH REPLIK PŘI NEDESTRUKTIVNÍ IDENTIFIKACI MATERIÁLU CHLADÍCÍCH KROUŽKŮ PRO DIESELGENERÁTORY JE DUKOVANY.....</b>	<b>167</b>
<b>USE OF METALOGRAPHIC REPLICA METHOD IN THE NONDESTRUCTIVE MATERIAL IDENTIFICATION OF COOLING INSERTS FOR DIESEGENERATORS IN DUKOVANY NPP.....</b>	<b>167</b>
PETR BRABEC A DANA TONAROVÁ.....	167
<b>REJSTŘÍK AUTORŮ .....</b>	<b>171</b>

ČEZ ESCO

- komplexnost
- inovace
- úspora
- odbornost



## Chytrá budoucnost vaší společnosti

**ČEZ ESCO nabízí inovativní a chytrá řešení energií  
pro firmy i celá města.**

Naše služby vám umožní stát se energeticky nezávislejší a ekologicky odpovědnější. Provedeme detailní audit a na základě jeho výsledku navrhne optimální projekt. Postaráme se o financování, celkovou realizaci i následnou údržbu a servis.

Díky našim zkušenostem a dodávaným technologiím si můžete být jisti, že ČEZ ESCO je investice do budoucna, která přináší chytrá řešení pro vaši společnost.

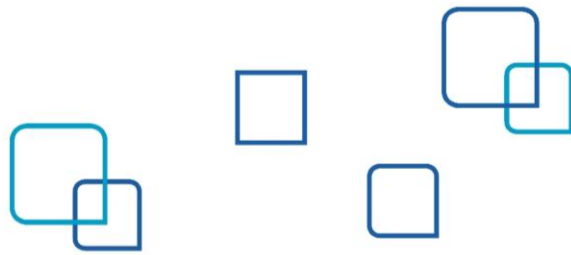
[www.cezesco.cz](http://www.cezesco.cz)



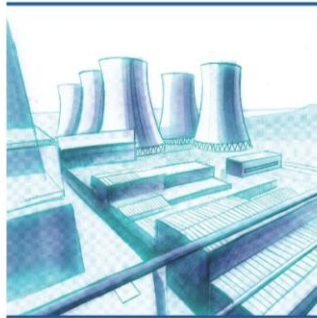
ČEZ ESCO

ENERGY  
SERVICE  
COMPANY

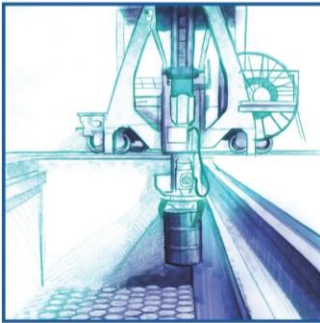




**Bezpečný  
a efektivní  
provoz  
energetických  
zařízení**



**Projektování  
a související  
inženýrské  
služby**



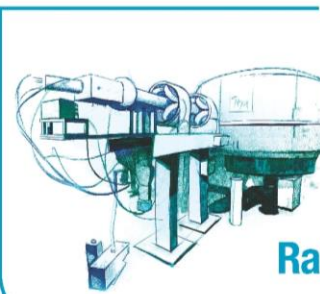
**Nakládání  
s radioaktivními  
i dalšími  
odpady**



**Vyřazování  
jaderných  
zařízení  
z provozu**



**Vodíkové  
technologie**



**Radiofarmaka**









## OTĚRUVZDORNÉ APLIKACE

EUTIT - naše firma vyrábí již od roku 1951 materiály sloužící k ochraně zařízení či dílů zařízení zejména před abrazí. Naše materiály současně chrání před chemickými vlivy prostředí a spolu s mechanicko fyzikálními vlastnostmi významně prodlužují životnost zařízení. **Vložky z taveného čediče nebo eucoru** se používají v pneumatické a hydraulické dopravě materiálů pro zvýšení životnosti potrubí např. v elektrárnách, teplárnách, dolech nebo jiných těžkých průmyslových provo-



Zásobníky na dřevní štěpku - čedičový obklad



Naše otěruvzdorné a chemicky odolné vložky mohou být ale také použity k ochraně dalších zařízení jako jsou skluzy, zásobníky, řetězové dopravníky, šnekové dopravníky, cyklony, odlučovače, namáhané podlahové plochy např. ve spalovnách dřevní štěpky a dalších. Otěruvzdorná vložka výrazně prodlužuje životnost abrazí namáhaných zařízení.



Původní opetřebená betonová stěna zásobníku



Vložkované otěruvzdorné a chemicky odolné díly

Ukázky otěruvzdorných dílů z čediče a Eucoru



Otěruvzdorná potrubí vložkovaná odlitky z taveného čediče nebo eucoru se používají nejčastěji pro pneumatickou dopravu práškových a jemnozrnných substrátů do max. rychlosti 22 m/sec. u čediče a 30 m/sec. u eucoru nebo k hydraulické dopravě silně abrazivních materiálů a kalů do rychlosti 2,2 m/sec. a maximálních pracovních přetlaků 4 MPa. Vložkovaných trub lze použít i pro trubkové řetězové dopravníky a to i pro dopravu horkých substrátů.





**UE** UNITED  
ENERGY

**ST** SEVEROČESKÁ  
TEPLÁRENSKÁ

*společně, jako jeden tým, dodáváme*

**Teplo**  
*z Komořan*

[www.ue.cz](http://www.ue.cz)

[www.setep.cz](http://www.setep.cz)







**TEPLÁRNA  
OTROKOVICE**  
LAMA energy group

**BEZPEČNÁ  
SPOLEHLIVÁ  
ENERGIE**

**TEPLÁRNA OTROKOVICE a.s.**

**výroba a rozvod tepla  
výroba elektřiny  
obchod s elektřinou**

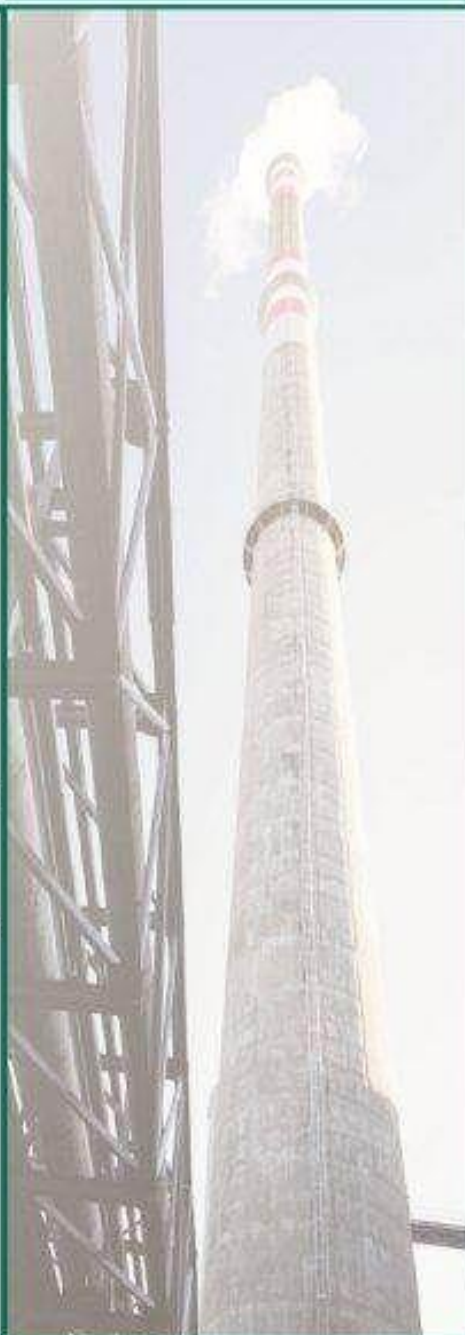
**člen skupiny**

**LAMA ENERGY GROUP**

**dodavatel plynu  
dodavatel elektřiny  
mobilní operátor**

**www.tot.cz**

**www.lamagroup.cz**







**UnionOcel**

Váš ocelový partner

# Otěruvzdorné plechy

Plechý, výpalky  
a komponenty  
v jakostech

**XAR**

**DUROSTAT**

**DILLIDUR**

**BRINAR**

**BRINAR 400Cr**

**X120 Mn 12**

**300–600 HB**

Speciální  
návarové materiály

**CORODUR**

**650–1000 HV**

**Vše z našeho  
skladového  
a servisního centra  
v Kopřivnici**

UnionOcel, s.r.o.  
Bavorská 2780  
155 00 Praha 5 – Stodůlky  
Tel.: +420 251 013 011

UnionOcel, s.r.o.  
Panská 1444  
742 21 Kopřivnice  
Tel.: +420 556 209 911

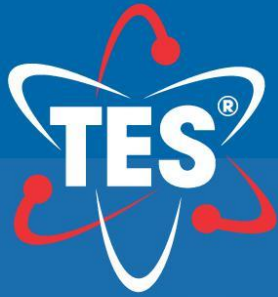
E-mail: [info@unionocel.com](mailto:info@unionocel.com)



[www.unionocel.com](http://www.unionocel.com)







[www.tes.eu](http://www.tes.eu)

## Inženýrské služby v jaderné energetice

- Výpočtové analýzy  
a jaderná bezpečnost
- Spouštění energetických celků
- Monitorovací a diagnostické systémy
- Inženýrská podpora provozu JE
- Technická podpora jaderného dozoru

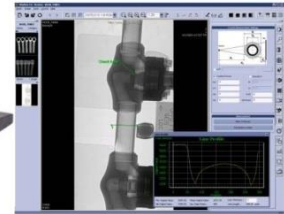


TES, s. r. o. | Pražská 597, 674 01 Třebíč | T: +420 568 838 411 | E-mail: [tes@tes.eu](mailto:tes@tes.eu)



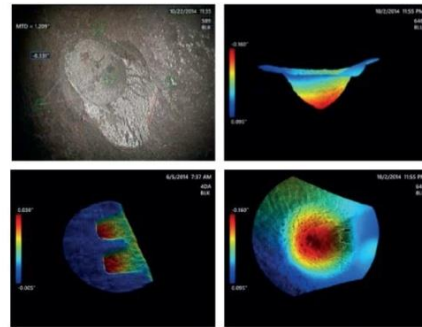
### Digitální Rentgenová technika

Online snímací  
DDA panely  
Systémy digitální  
radiografie CR  
Rentgenky a  
generátory



### Endoskopy s 3D zobrazením a měřením

MENTOR Visual IQ  
Ca-Zoom® Pan Tilt Zoom kamery



### Ultrazvuk

MENTOR UT – mapování koroze  
PALM a FLAT Scannery  
DMS Go+, USM Go+  
Phased Array sondy  
Online snímače



### Inspekční roboti

Mapování koroze  
Kontrola svarů  
Visuální kontrola  
nedostupných  
míst







## ŘEŠENÍ PRO TĚŽKÝ PRŮMYSL A ENERGETIKU



Společnost MECAS ESI, jako součást ESI Group, je uznávaným světovým dodavatelem nástrojů **počítačové simulace v oblastech návrhu prototypů a výrobních procesů**. Zabývá se řešením komplexních inženýrských projektů a prodejem pokročilého softwaru včetně služeb s tím spojených.

Tým inženýrů MECAS ESI poskytuje **technickou podporu a konzultace** v oblasti provádění multifyzikálních analýz včetně posouzení limitních stavů, simulací nárazových zkoušek, provádění analýz výrobních procesů tváření, lití, svařování, tepelného zpracování, ale také například analýzy vibroakustiky, proudění a elektromagnetické kompatibility.

**V odvětví těžkého průmyslu a energetiky poskytuje společnost MECAS ESI služby pro následující oblasti:**

### Návrh zařízení a oblast řízeného stárnutí energetických komponent

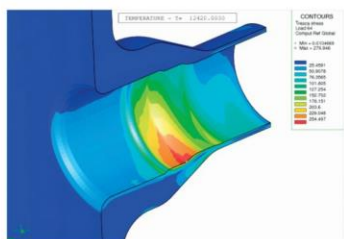
- Statické analýzy v lineární a nelineární oblasti (SYSTUS a VPS\*)
- Dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti (SYSTUS a VPS)
- Teplotní analýzy (SYSTUS a VPS)
- Analýzy proudění (OpenFOAM)
- Vibroakustika (VA one)
- Nárazové zkoušky (VPS)
- Posouzení limitních stavů - únava, creep, lomová mechanika (SYSTUS a VPS)
- Interaktivní vizuální rozhodování využívající technologie virtuální reality (IC.IDO)

### Výroba & optimalizace výroby

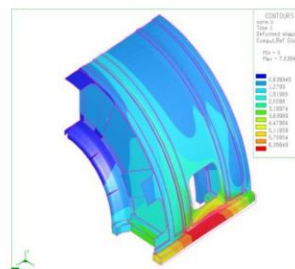
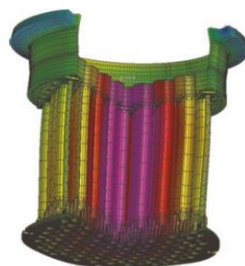
- Odlévání (Pro CAST)
- Svařování (SYSWELD)
- Tepelné zpracování (SYSWELD)
- Objemové tváření (QFORM)
- Plošné tváření (PAM STAMP)
- Ohýbání trubek (PAM TUBE)
- Zobrazení procesů ve 3D (IC.IDO)

\*Virtual Performance Solution - původní PAM-CRASH, který je komplexně rozšířen i na implicitní řešení multifyzikálních úloh.

**Produkty společnosti ESI Group jsou vzájemně propojitelné, tzn. lze provádět numerické simulace 3. generace, kde jsou zastoupeny jednotlivé výrobní procesy a následně i analýzy provozních stavů, případně limitních stavů.**



Se souhlasem COMEX NUCLEAIRE



Se souhlasem ŠKODA POWER a.s.





Člen federace evropských materiálových společností – FEMS

<http://www.csnmt.cz>

### **Zaměření činnosti a cíle společnosti**

ČSNMT, založená v roce 1993, je dobrovolným sdružením individuálních a kolektivních členů (firem, ústavů, vysokých škol a jiných neziskových institucí). Činnost společnosti spočívá zejména v:

- organizování odborných styků, výměně zkušeností a společném řešení odborných problémů
- rozšiřování informací o nových materiálech a technologiích
- podporování a sponzorování výzkumu, vývoje a aplikace nových materiálů a technologií
- organizování transferu nových technologií mezi kolektivními členy společnosti
- podporování a propagování výuky materiálového inženýrství na vysokých školách, včetně postgraduálního doktorského studia
- podporování absolventů vysokých škol na počátku jejich kariéry a v péči o růst jejich tvůrčí způsobilosti
- organizování spolupráce a výměny zkušeností a informací atp. s příbuznými společnostmi v tuzemsku i zahraničí
- řešení národních i mezinárodních projektů výzkumného i nevýzkumného charakteru

### **Odborné tematické oblasti**

Kovy, polymery, sklo a keramika, uhlíkové materiály, materiály pro elektrotechniku a elektroniku, textilní materiály, stavební materiály, biomateriály, nanomateriály a nanotechnologie, povrchové inženýrství, pokrokové technologie výroby a zpracování materiálů, charakterizace a zkoušení materiálů.

### **Organizační uspořádání společnosti**

Organizační struktura ČSNMT je vybudována na principech dobrovolnosti, demokracie a vzájemné spolupráce. Tvoří ji: generální shromáždění členů (1x ročně), statutární orgány, řídicí výbor, kontrolní komise, odborné a tematické skupiny, sekretariát, kluby (pobočky) ČSNMT v regionech, instituce Ceny ČSNMT.

### **Hlavní trvalé aktivity**

- Vydávání publikace „Průvodce systémem státní podpory výzkumu a vývoje v České republice“
- Vydávání příruček
- Vydávání elektronické publikace „Zpravodaj ČSNMT“
- Spolupřádání mezinárodních konferencí „METAL“, „NANOCON“, konferencí o struktuře materiálů a mikromechanice lomu (MSMF), „COMAT“ a česko-slovenských konferencí „Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů“
- Spolupřádání národních konferencí „Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“ a „Dny tepelného zpracování“
- Organizování účasti českých doktorandů na mezinárodních konferencích Junior Euromat v Lausanne

### **Mezinárodní spolupráce**

- Federation of European Materials Societies
- Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM)
- The Institute of Materials, Minerals and Mining Velká Británie
- The European Network of Materials Research Centres (ENMAT)

#### **Sídlo ČSNMT**

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1  
tel./fax: 221082329, e-mail: [csnmt@csnmt.cz](mailto:csnmt@csnmt.cz)







## Nepřímá vizuální kontrola obtížně přístupných prostor

### Robustní, odolný ale přenosný IPLEX G Lite videoskop

Nepřímá vizuální kontrola se často odehrává ve velmi nepřístupných prostorech a to vyžaduje lehké a odolné přístroje, se kterými je možno do těchto prostor proniknout. Videoskop Olympus IPLEX G Lite kombinuje odolný, kompaktní design se skvělou světelností a intuitivním ovládáním pro spolehlivé kontroly a přesné expertízy v jakémkoli místě.



Robustní a odolný design pro náročné inspekční podmínky



Rychlejší kontroly díky velmi intuitivnímu ovládání



Lepší detekce poškození díky skvělému zobrazení

[www.olympus-ims.com/en/rvi-products/IPLEX-g-lite](http://www.olympus-ims.com/en/rvi-products/IPLEX-g-lite)

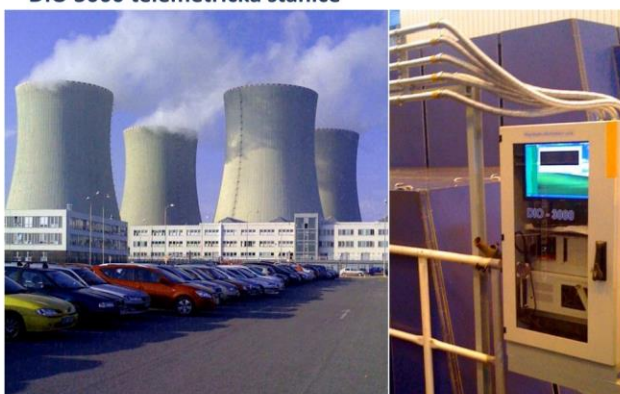


# STARMANS

STARMANS electronics je inženýrská a výrobní společnost, která poskytuje pokročilé technologické produkty a řešení pro nedestruktivní testování a vyhodnocení. Vyvíjíme, navrhujeme a vyrábíme přenosné ultrazvukové zařízení a systémy pro ultrazvukovou, infračervenou, magneto-práškovou inspekci a X-ray testování.

## Telemetrická stanice

### DIO 3000 telemetrická stanice



- je komplexní průmyslový systém používaný pro sběr dat ze senzorů umístěných na důležitých místech turbín pro kontrolu správné polohy hřídele, průhyb hřídele, oscilace, vibrace lopatek, ohyb lopatek a sleduje tak účinnost a zatížení turbín. Cílem je predikce budoucích možných závad turbíny. Grafický barevný displej umožňuje sběr dat a má záznamové zařízení.

## Digitální ultrazvukový defektoskop

### Defectobook® DIO1000 PA nyní umožňuje zobrazování v režimu Phased Array vyvinutý a navržený firmou STARMANS.

Digitální ultrazvukový defektoskop Defectobook® DIO1000 PA nyní umožňuje zobrazování v režimu Phased Array. Je kombinací všech funkcí konvenčního ultrazvuku s fázovým posunem. Použitím nejnovější generace elektronických komponent a mikroprocesorů jsme vyrobili nejtenčí, nejlehčí a skutečně přenosný Phased Array přístroj. Standardní konfigurace je s 16 elementovou sondou s možností zakoupit a měřit se sondou s 32 elementy.

### HLAVNÍ OBORY POUŽITÍ:

- Energetika - austenitické sváry, hnací hřídele, zkoušení lopatek,
- Letectví a kosmonautika - zkoušení kompozitů
- Výroba oceli - velkých odlitků, válcované oceli za tepla a za studena
- Strojírenství - sváry a spoje
- Železnice - traťové uzly manganové oceli, kola, osy
- Inspekce potrubí - svárů, spojů









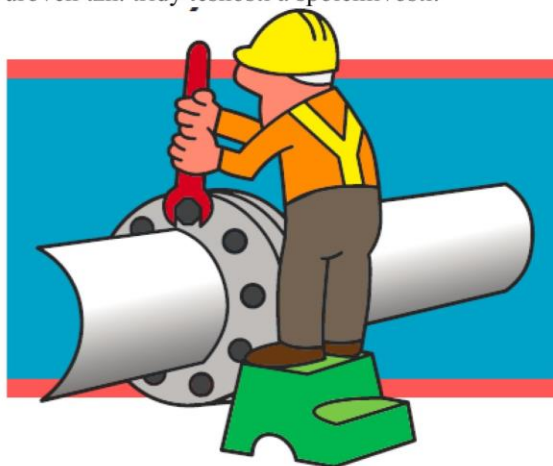
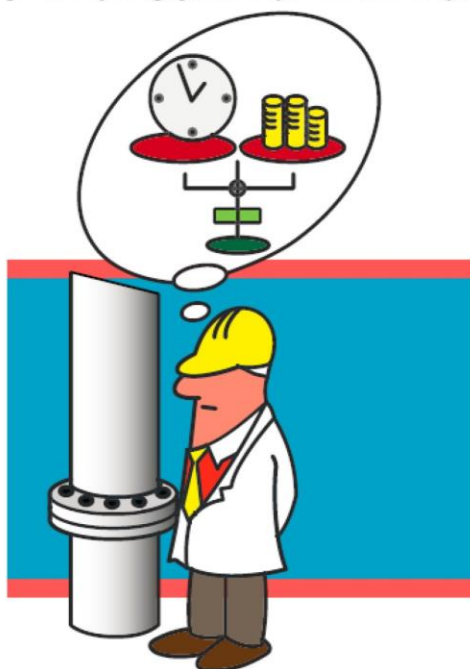
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

KONZULTACE & ODBORNÉ POSUDKY

VÝPOČTY, ZKOUŠKY, KVALIFIKACE & ŠKOLENÍ

## Školení personálu pro montáž přírubových spojů podle ČSN EN 1591-4

V dubnu 2014 začal platit nový standard s názvem „Příruby a přírubové spoje – Část 4: Kvalifikace odborné způsobilosti personálu k montáži šroubových spojů v tlakových zařízeních v kritických aplikacích“, který posunuje práci zejména montáž přírubových spojů tlakových zřízení na vyšší úroveň tzn. třídy těsnosti a spolehlivosti.



Nabízíme školení dle tab. 1, 3, 4 a 11 podle této normy pro personál zabývajícího se montáží přírubových spojů a po absolvování školení akreditované ověření této problematiky s odpovídajícím osvědčením (certifikátem odborného personálu).

Pracovníci odpovědní za montáž přírubových spojů musí získat a prokázat odpovídající znalosti a dovednosti. Proto je v normě nastíněn způsob, jak se toho má dosáhnout. Norma řeší kvalifikaci lektora a posuzovatele/zkoušejícího, způsoby výcviku příslušného personálu, stupně a úrovně kvalifikace, efektivnost výcviku, posuzování odborné způsobilosti, získání osvědčení (certifikace), dobu jeho platnosti a prodloužení a zařazení výcviku do systému managementu kvality.

Více na [www.techseal.cz/skoleni](http://www.techseal.cz/skoleni) nebo [www.SkoleniMonteru.cz](http://www.SkoleniMonteru.cz)

**Provozní bezpečnost a těsnost tlakových zařízení je zásadní prioritou v oblasti bezpečnosti práce, ochrany zdraví, životního prostředí a kvality výroby tzv. HSEQ.**

Odborný garant:  
**Doc. Ing. J. Lukavský, CSc.**  
*Ústav procesní a zpracovatelské  
techniky, fakulta strojní  
ČVUT Praha  
Technická 4  
166 07 PRAHA 6*

tel.: +420 604 443 284

Kontaktní osoby:  
**Ing. J. Tomáš**  
*Technický úsek*

TECHSEAL s.r.o.  
Černokostelecká 128/161  
102 00 PRAHA 10  
[technici@techseal.cz](mailto:technici@techseal.cz)  
tel.: +420 602 337 058





FAKULTA STROJNÍ  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI

REGIONÁLNÍ  
TECHNOLOGICKÝ  
INSTITUT

# REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT

strojírenské výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni

## VÝZKUMNÉ PROGRAMY:

Konstrukce vozidel a pohonných systémů  
Modernizace výrobních strojů  
Obráběcí technologie  
Tvářecí technologie

## LABORATOŘE:

Virtualní prototypování  
Plánování výroby  
Obrábění  
Experimentální obrábění  
Experimentální tváření  
Provozní pevnost a únavová životnost  
Metalografie  
Mechanická zkušebna  
Metrologie  
Zkušebna dopravních prostředků  
Strojírenské experimentální metody

Regionální technologický institut, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377 638 701, [www.rti.zcu.cz](http://www.rti.zcu.cz)







EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
OP Výzkum, vývoj a vzdělávání



**Název programu:** Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání  
**Číslo výzvy:** 02\_18\_069  
**Název výzvy:** Výzva č. 02\_18\_069 pro Předaplikační výzkum pro ITI II v prioritní ose 1 OP

Projekt: Předaplikační výzkum povrchových úprav aplikovaných pomocí perspektivních pokročilých technologií

Project: Pre-Application Research of Coatings Applied to Surface by Progressive Advanced Technologies

### **Anotace projektu:**

Projekt je zaměřen na předaplikační výzkum a studium povlaků, aplikovaných pokročilými technologiemi nástřiku, zejména technologií nástřiku kaskádovým plazmatem a technologií nástřiku za studena, tzv. Cold Spray. Cílem záměru je vývoj nových typů zároveň stříkaných povlaků, disponujících unikátními vlastnostmi, kombinujícími výhody nanášení nejmodernějšími technologiemi a širokým portfoliem zdrojových materiálů. Důraz bude kladen na oblast povlaků a multivrstev pro dynamické namáhání.



# Žárové nástřiky: budoucnost povrchových úprav

Žárové nástřiky umožní podstatné zvýšení životnosti materiálů, snížení výrobních nákladů i ekologické zátěže vašich produktů. Kompletní vývoj i aplikaci zajišťuje moderní technologické centrum vybavené infrastrukturou unikátní ve střední Evropě. VZU Plzeň, česká firma se 110letou tradicí a celosvětovou působností.

#### Přehled technologií VZÚ Plzeň

- Kaskádový plazmový nástřik
- Vysokorychlostní nástřik (HP/HVOF)
- Nástřik plamenem (FS)
- Nástřik elektrickým obloukem (TWAS)





# STAV PROJEKTU IVMR HORIZON 2020 – EXPERIMENT PRO POTVRZENÍ IVMR PRO VVER 1000

## PRESENT STATUS IVMR HORIZON 2020 PROJECT – TESTS FOR THE IVMR CONFIRMATION FOR VVER 1000

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Vladislav Krhounek, David Bátěk a Marek Benčík

ÚJV Řež a.s.

### Abstrakt

V rámci EU Projektu HORIZON 2020 IVMR, ÚJV Řež a.s. odpovídá za řešení TASK 4 s cílem vybudovat experimentální zařízení (THS-15) umožňující simulovat tepelné toky z roz-taveného Coria v průběhu těžké havárie do stěny tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 se sou-časným chlazením vnějšího povrchu. Pro maximální přiblížení k reálným podmínkám jsou do-drženy výškové charakteristiky šachty reaktoru a je modelována úhlová výseč TNR  $3.8^\circ$ . Šířka kanálu je 150 mm. V prezentaci uvedeme současný stav dosažených výsledků.

### Abstract

Within the EU Project HORIZON 2020 IVMR, the ÚJV Řež a.s. is responsible for TASK 4 with goal to build the experimental facility (THS-15) with capabilities to simulate the heat fluxes from the melted Corium during the severe accident to the reactor pressure vessel wall of VVER 1000 with cooling of the outer surface. For maximum simulation of the real design con-ditions the height of the RPV cavity and angular RPV segment of  $3.8$  degrees is performed. The width of the cooling channel is 150 mm. In our presentation status of results will be presented.

### Charakteristiky konstrukce THS-15

Experimentální zařízení je smyčka modelující přestup tepla z reaktorové nádoby (TNR) do šachty reaktoru při těžké havárii. Pro větší přiblížení k reálným podmínkám jsou u THS-15 dodrženy výškové charakteristiky konstrukce po výšce (ode dna šachty reaktoru do místa opory TNR). Modelována je úhlová výseč  $3,8^\circ$  reprezentující prostor mezi stěnou šachty reaktoru a TNR. Šířka kanálu v místě stěny představující reaktorovou nádobu je 150 mm. Vývin tepla uvnitř reaktorové nádoby je simulován elektrickými topnými patronami, jejichž modulové uspořádání umožňuje modelovat prakticky libovolný profil tepelného toku do stěny TNR. Na rozdíl od reálné VVER-1000 není stěna dna modelována jako úhlová výseč, ale z konstrukčních důvodů je zvolena konstantní šířka kanálu 150 mm. Průtočná plocha kanálu se předpokládá konstantní po výšce kanálu. Předpokládá se, že v průběhu experimentu bude v THS-15 udržo-vána hladina vody prakticky v plné výšce chladicího kanálu.

Zařízení THS-15 je navrženo jako uzavřená smyčka, ve které je generována pára při ohřevu chladiva na vnějším povrchu oceli, která je explozivně přivařena na měděné topné segmenty. Vznikající pára je odváděna z horní plochy kanálu potrubím do kondenzátoru. Z kondenzátoru je kondenzát odváděn do chladiče, zde je dochlazen na teplotu kolem  $20^\circ\text{C}$  a následně je chla-dící medium pumpováno do spodní části šachty ve stejné poloze jako je vyústění vzduchového chladicího kanálu ve středu podlahy šachty pod reaktorem. Čerpadlo, které chladící medium pumpuje neovlivňuje proudění v kanálu THS-15, pouze doplňuje chladící medium a kompen-zuje odvedenou páru do kondenzátoru. Celkové schéma chladicího kanálu s kondenzátorem a dalšími chladíci okruhy je uvedeno na obr. 1.

### Nejdůležitější informace o provozu THS-15

Pro řízení, regulaci a sběr dat v průběhu provozu THS-15 byl vyvinut speciální software instalovaný na počítači řídicího velínu. Software umožňuje graficky zobrazit měřené parametry jako jsou teploty, tlaky, hmotnostní průtoky chladicího media, hladinu v kondenzátoru a další

veličiny. Software rovněž umožňuje elektronicky řídit celé zařízení a dodržet nastavené bezpečnostní limity celého zařízení.

Před vlastním zahájením ohřevu celého kanálu je celý kanál zaplněn chladícím médiem až do úrovně, kde přechází kanál do potrubí pro odvod páry. V počáteční fázi operátor nastaví celkový příkon do topných těles na hodnotu cca 10 % celkového příkonu (cca 70 kW), tak aby byl zajištěn postupný ohřev celého kanálu s rychlostí max. 30 °C/h. V průběhu ohřevu, doplňující čerpadlo je používáno, ohřátá voda přetéká do kondenzátoru. Voda v chladícím kanále a v kondenzátoru bude ohřívána až do úrovně saturace. Do tohoto stavu sekundární okruh je uzavřen. V okamžiku, kdy teplota v primárním okruhu dosáhne cca 100 °C, operátor otevře sekundární okruh.

Následující vznik varu znamená lehký nárůst tlaku v experimentálním kanálu ve srovnání s atmosférickým tlakem, napájecí čerpadlo je proto odpojeno. S varem dochází k poklesu hladiny vody v kanále. Operátor začíná periodické odvzdušnění. Po dosažení předepsané hladiny vody v kanále, je zapnuta regulace vodní hladiny. Zařízení je připraveno k zahájení experimentálního programu. Odvod vzduchu je nyní uzavřen. Tlak primárního okruhu je nastaven v souladu s plánovaným experimentem a udržován pomocí sekundárního okruhu.

Zvyšování elektrického příkonu nesmí převýšit 45 kW až do dosažení celkového příkonu 140 kW. Zvyšování příkonu je provedeno cca v 5 postupných navýšeních v každém topném segmentu podle předem definovaného simulovaného rozložení.

### **Základní analytická podpora**

Nejdůležitější analytická podpora je nejenom z Divize 2200 v ÚJV s využitím kódů MELCOR, FLUENT a RELAP, ale i z Kurchatov Institute v Moskvě kódy SOCRAT/HEFEST a ASTEC. Rovněž IVS Trnava provedl výpočty kódem ASTEC. V období 2012 – 2014 ÚJV iniciovalo projekt EU pod vedením JRC Petten, jehož cílem byl Benchmark analytický projekt s účastí 13 expertních organizací EU včetně KI Moskva a IPP Ukrajina. Výsledky tohoto mezinárodního Benchmark projektu jednoznačně potvrdily nutnost dalších analytických prací, ale zejména nutnost provést kvalifikované experimenty na malých vzorcích, ale zejména na termo-hydraulické smyčce, která bude maximálně simulovat skutečnou konfiguraci šachty reaktoru s tlakovou nádobou, přívod chladícího media a odvod páry. Pro experimentální verifikaci na zařízení THS-15 na základě všech provedených analytických výpočtů bylo zvoleno 5 reprezentativních profilů teplotního toku, z toho 3 profily s dvou vrstvou konfigurací a dva profily s tří vrstvou. Pro dvou vrstvou konfiguraci se jedná o výsledky FLUENT+RELAP-3D, SOCRAT Early and Late Phase, pro tří vrstvou konfiguraci jsou využity výsledky kódu SOCRAT. Pro základní názor na průběh tepelných toků od dna tlakové nádoby do kritické výšky bazénu Coria ve válcové části tlakové nádoby uvedeme výsledky získané kódem FLUENT (ÚJV Řež) na obr. 2 pro dvou vrstvou konfiguraci v čase 2 h 30 min a na obr. 3 pro tří vrstvou konfiguraci v čase 2 h 51 min.

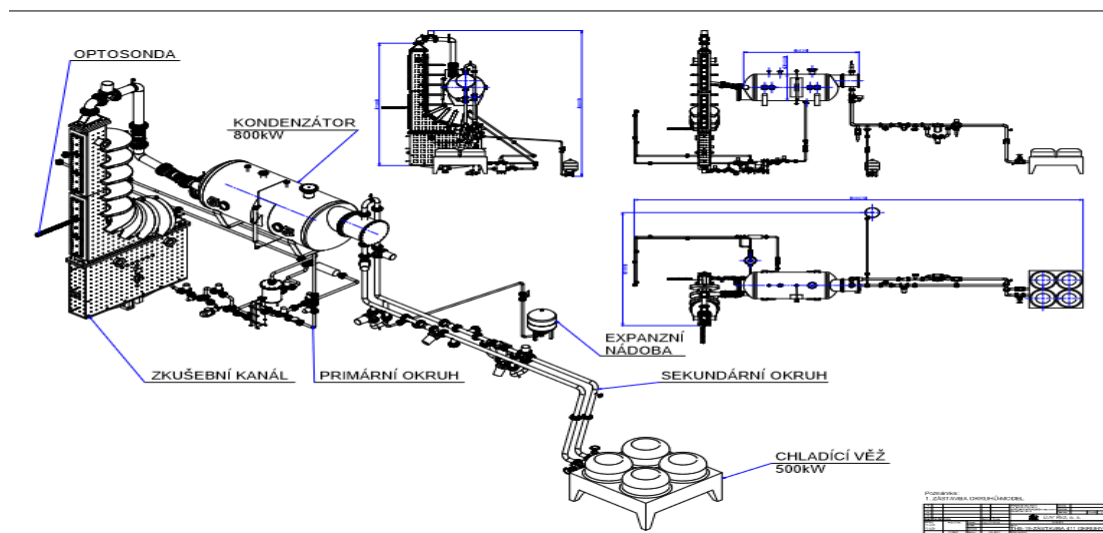
### **Souhrn nejdůležitějších získaných výsledků**

Do srpna 2018 bylo provedeno 20 experimentů, které jsou detailně popsány v tabulce 1, včetně popisu využitých výpočtových kódů a základních parametrů provozu THS-15. Nejvyšší dosažený tepelný tok pro tří vrstvou konfiguraci bazénu Coria v čase 10 310 s („late phase“) má hodnotu 1,56 MW/m<sup>2</sup> ve výšce 2 m od dna tlakové nádoby. U žádného ze zkoušených teplotních profilů nedošlo ke krizi varu. Po každé sérii experimentů jsou provedeny další hardware i software úpravy celého zařízení s cílem zlepšit celkovou konfiguraci provozu a řízení THS-15. Zařízení funguje spolehlivě a je připraveno k další sérii testů začátkem září 2018. V připravovaných dalších experimentech se chceme postupně přibližovat k hodnotám kritických tepelných toků pro různé konfigurace teplotních profilů. EU projekt HORIZON 2020 IVMR kde ÚJV Řež je hlavním řešitelem WP 4 s cílem vybudovat THS-15 a provést relevantní experi-

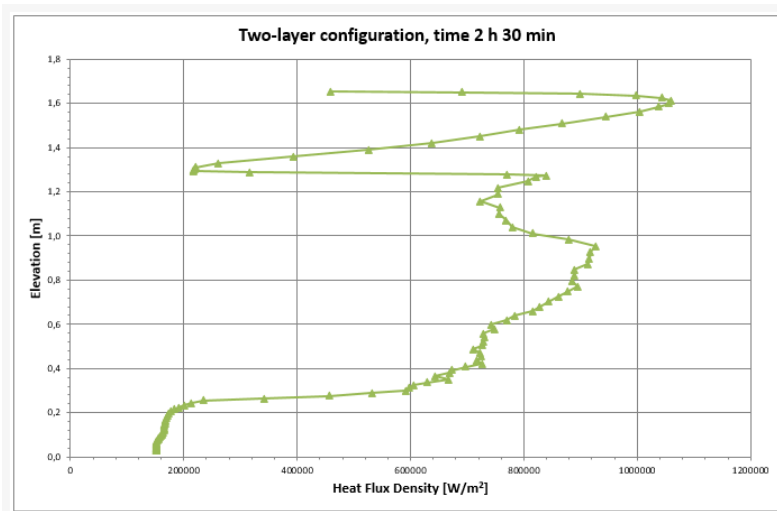
menty s vnějším chlazením kanálu byl prodloužen do konce roku 2019. Nad rámec tohoto projektu chceme v závěrečných experimentech odzkoušet i funkci deflektoru uvnitř chladičho kanálu a provést případnou úpravu chlazeného vnějšího povrchu s cílem zvýšit rezervu do kritického tepelného toku. Na závěr je možné konstatovat rostoucí zájem o výsledky THS-15 experimentů zejména proto, že naše zařízení nejpravděpodobněji simuluje chlazení vnějšího povrchu TNR při těžké havárii a má největší šanci prokázat udržení Coria uvnitř tlakové nádoby.

## Literatura

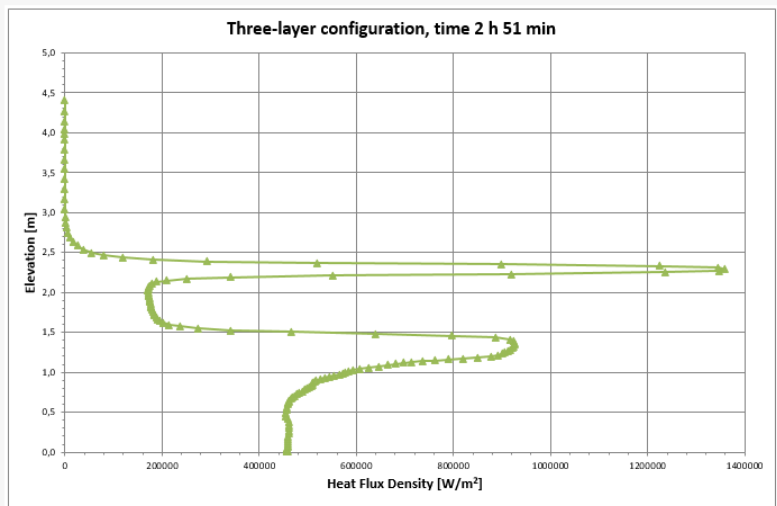
- [1] Benčík, M. (2015): *Analýzy experimentálního zařízení THS-15 a VVER 1000 programem RELAP5-3D*. ÚJV Z 4520.
- [2] Šafaříková, V. (2015): *CFD simulace proudění v experimentálním kanále THS-15*. ÚJV Z 4383 T.
- [3] JRC Technical Reports (2015): *In-Vessel Melt retention (IVMR) Analysis of a VVER-1000 NPP*.
- [4] Second Periodic Activity Report IVMR-Grant Agreement 662157(2017): *In-Vessel Melt retention Severe Accident Management Strategy for Existing and Future NPPs*.
- [5] IVMR ÚJV Řež Team (2018): *THS-15 Measurement Reports and data analysis*.



Obr. 1: Celkové schéma chladičho kanálu THS-15



Obr. 2: Tepelný tok pro dvouvrstvou konfiguraci, kód FLUENT v čase 2 h 30 min



Obr. 3: Tepelný tok pro třívrstvou konfiguraci, kód FLUENT v čase 2 h 51 min

Tabulka 1: Souhrn experimentálních výsledků na THS-15, srpen 2018

Číslo protokolu	Název zkoušeného profilu	Výpočetní kód	Kdo výpočet provedl	Hodnota a el. Příkonu (kW)	Požadované maximum tepelného toku (MW/m <sup>2</sup> )	Dosažené maximum tepelného toku (MW/m <sup>2</sup> )	Topný segment Cu s max.HF	Výška maxima HF od dna TNR	Byla krize varu Ano/Ne	Tlak v kondenzátoru (Mpa)	Tlak v chladicím kanále vstup-výstup (Mpa)	Teplota chladicího média na vstupu do kanálu (st C)	Plocha pro odvod páry (cm <sup>2</sup> )	Chladicí medium
1	Early Phase	SOCRAT	KI	193	1,11	1,21	16 1	2	Ne	0,11-0,14	0,21-0,27	30	31,4	demi
2	Early Phase	SOCRAT	KI	193	1,11	1,22	16 1	2	Ne	0,13-0,15	0,16-0,22	30	31,4	demi
3	Fluent 1.1	Fluent	UJV	232	1,02	1,02	14	1,5	Ne	0,11-0,14	0,23-0,3	30	31,4	demi
4	Fluent 1.2	Fluent	UJV	233	1,05	1,05	14	1,5	Ne	0,1-0,11	0,23-0,29	30	31,4	demi
5	Fluent 1.5	Fluent	UJV	299	1,02	1,02	14	1,5	Ne	0,08-0,11	0,15-0,25	30	31,4	demi
6	Late Phase 1.1	SOCRAT	KI	312	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,11-0,13	0,29-0,39	30	31,4	demi
7	Early Phase 1.2	SOCRAT	KI	135	0,79	0,86	16 1	2	Ne	0,9-0,1	0,12-0,2	30	31,4	demi
8	Late Phase 1.2	SOCRAT	KI	316	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,1	0,3-0,36	30	31,4	demi
9	Late Phase 1.5	SOCRAT	KI	402	0,72	0,72	9,10,11	1-1,3	Ne	0,9-0,12	0,38-0,45	30	31,4	demi
10	10310s 1.1	SOCRAT	KI	258	0,94	0,94	12	1,4	Ne	0,08-0,1	0,23-0,32	30	31,4	demi
11	10310s 1.3	SOCRAT	KI	284	1,36	1,36	15	1,7	Ne	0,08-0,09	0,24-0,31	30	31,4	demi
12	10310s 1.2	SOCRAT	KI	353	1,43	1,56	16 1	2	Ne	0,10-0,11	0,28-0,39	30	31,4	demi
13	10310s 1.5	SOCRAT	KI	356	0,94	0,94	12	1,4	Ne	0,09-0,1	0,28-0,36	30	31,4	demi
14	12510 1.5	SOCRAT	KI	398	0,74	0,81	16 1	2	Ne	0,10-0,11	0,37-0,42	30	31,4	demi
15	12510 1.1	SOCRAT	KI	284	0,84	0,81	16 1	2	Ne	0,09-0,1	0,28-0,34	30	31,4	demi
16	12510 1.4	SOCRAT	KI	320	1,97	1,41	16 2	2,4	Ne	0,09-0,1	0,28-0,35	30	31,4	demi
17	12510 1.3	SOCRAT	KI	337	1,97	1,55	15	1,7	Ne	0,10-0,11	0,28-0,35	30	31,4	demi
18	IVS	ASTEC	IVS	236	1,4	1,4	12	1,4	Ne	0,05-0,07	0,15-0,25	30	31,4	demi
19	10310s 2.4	SOCRAT	KI	387	1,48	1,48	16 2	2,4	Ne	0,10-0,25	0,29-0,4	30	31,4	demi
20	10310s 2.5	SOCRAT	KI	387	1,02	1,02	12	1,3	Ne	0,10-0,12	0,31-0,4	30	31,4	demi



# VIRTUÁLNÍ NUMERICKÉ SIMULACE JAKO PODPORA NÁVRHU, VÝROBY A PROVOZU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

## VIRTUAL NUMERICAL SIMULATION AS SUPPORT OF DESIGN, MANUFACTURING AND OPERATION OF ENERGETIC FACILITY

Marek Slováček

MECAS ESI s.r.o., Brojova 16, 326 00 Plzeň

### Abstrakt

Použití virtuálních numerických analýz se v současné době nevyhnulo ani oblasti energetiky. Moderní nástroje počítačové simulace, lze použít ve velmi široké oblasti, tzn. jak v oblasti návrhu konstrukce (statické a dynamické analýzy, predikce životnosti, predikce proudění atd.), výroby (numerické analýzy odlévání, kování, svařování, tepelného zpracování atd.), tak během provozu (predikce vzniku a růstu vad, analýzy provozních režimů s predikcí životnosti, analýzy dopadů oprav na životnost atd.). V současné době lze virtuálními numerickými simulacemi vyhodnotit vliv výrobních procesů, případných oprav a provozních parametrů na životnost jednotlivých komponent energetických zařízení. Cílem příspěvku je detailně popsat a shrnout dostupné možnosti numerických analýz během návrhu, výroby a provozu komponent energetických zařízení.

### Numerické analýzy v oblasti energetiky

Nyní je stále diskutován průmysl 4.0, což je označení pro současný trend plné digitalizace a s ní související automatizace výroby a kontroly procesů. Cílem je vytvořit tzv. chytré továrny nebo provozy, které budou využívat kyberneticko-fyzikální systémy, které převzou činnosti, které vykonávali lidé. Předpoklad digitalizace celého procesu nebo návrhových a kontrolních mechanismů je soubor numerických simulačních programů a jejich vzájemného spojení. Cílem článku a prezentace je dát obecný přehled možností numerických analýz fyzikálních procesů, dále možnosti vizualizace procesů a managementu s daty. Na základě spojování uvedených procesů, resp. software lze provést spojení tzv. Hybrid Twin, kde jde především o spojení prvního návrh pomocí systému modeling Simulation X, sběru dat, jejího vyhodnocení, provedení numerických analýz a potom reálnou vizualizaci.

Virtuální numerické simulace pro oblast energetiky můžeme rozdělit do následujících skupin:

- 1. Návrh zařízení** (převážně statické – obr. 1 a dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti, analýzy proudění, popř. včetně tepelného přenosu – obr. 2, analýzy vibroakustiky, predikce životnosti, analýzy havarijních stavů – nárazové zkoušky lopatek turbín, nárazové zkoušky potrubních systémů atd.) Při návrhu zařízení se uplatňují nové progresivní trendy, jako je např. posouzení míry konzervativnosti návrhových analýz zahrnutím přesného vlivu výrobních procesů. Například je velmi používané spojení numerických analýz svarových spojů s následným posouzením statické či dynamické pevnosti, dále životnosti, případné limitní posouzení na základě principů lomové mechaniky. Ve výpočtech mezních stavů se již uvažují předchozí výrobní vlivy jako je nehomogenní materiálová struktura, zbytková napětí a plastické deformace. Dalším příkladem je např. numerická simulace ohýbání trubek s následným tepelným zpracováním – obr. 7, dalším krokem je svařování a následující pevnostní analýzy s posouzením limitních stavů.
- 2. Výroba** (oblast lití, svařování, kování, lisování, ohýbání atd.) Na základě numerických simulací výrobních procesů lze provést optimalizaci jednotlivých technologických operací s cílem snížení nákladů výroby, zkrácení přípravného procesu, či snížení počtu zmetků, resp. oprav. Dalším aspektem je samozřejmě výroba zařízení s co nejnižší úrovní zbytko-

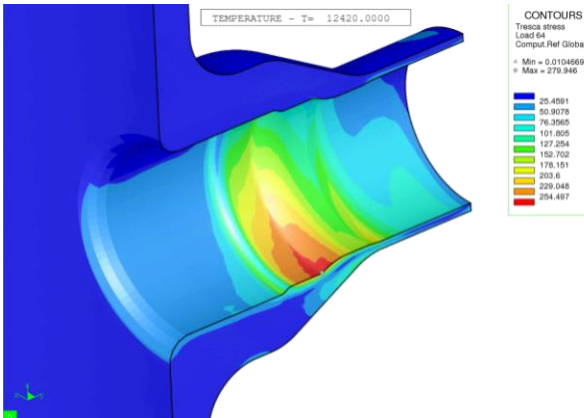
vých napětí a plastických deformací, příznivou materiálovou strukturou a požadovanými materiálovými vlastnostmi, aby byl dosažen co nejdelší bezporuchový provoz zařízení. Na obr. 3 je uveden model z numerické analýzy lití ingotu, následného převozu a ohřevu na kovací teplotu. Cílem byla optimalizace tepelného režimu tak, aby bylo v maximální míře omezen vznik vycezenin a ředin, dále aby byla obdržena požadovaná struktura a zároveň minimální úroveň zbytkových napětí. V uvedeném případě rovněž šlo o tzv. numerickou simulaci 3 generace, tzn. byly spojeny analýzy odlévání a tepelného zpracování, včetně numerické simulace převozu ingotu na vagónu s uvažováním vlivu sálání mezi ingotem a vagónem, viz obr. 4. Na obr. 5 je predikce deformací po svařování tělesa nízkotlakého dílu turbíny. Byl numericky simulován „assembly“ proces svařováním. Celý díl byl složen z 12 samostatných svařovaných podsestav. Každá podsestava byla řešena samostatně jako „lokální“ numerická analýza. Nakonec byly jednotlivé podsestavy svařeny v jeden celek pomocí tzv. „globálního přístupu“. Na obr. 6 je uvedeno výsledné zbytkové napětí po provedení optimalizační numerické simulace svařování opravy turbínové skříně. Na obr. 7 je uvedena numerická analýza ohýbání trubek s cílem posouzení možnosti vzniku vad v ohybu.

- 3. Oblast řízeného stárnutí** (statické a dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti, analýzy proudění, analýzy vibroakustiky, predikce životnosti, nárazové zkoušky, lomová mechanika, optimalizace oprav atd.). Cílem uvedené oblasti je provedení vybraných numerických simulací s cílem získat informace o degradaci konstrukce během provozu a predikce její životnosti na bázi skutečných zatěžovacích režimů zjištěných během provozu. Samozřejmě, i zde se vyskytují návrhové numerické analýzy, a to těch komponent, které nesplňují požadavky na funkčnost a životnost, a musí se nahradit zařízeními nové konstrukce. Dále na základě numerických analýz lze provést optimalizace technologií oprav svařování se zahrnutím jejich vlivů na další provoz komponenty. Dalšími typickými analýzami je posouzení nalezených vad na bázi principů lomové mechaniky, jejich případný růst a rozhodnutí o provozu zařízení, opravě nebo kompletní výměně. Na obr. 8 jsou uvedena teplotní pole na T spoji během provozu. Cílem bylo pomocí CFD analýz zjistit skutečné teplotní zatížení, dále provést analýzy pevnosti s cílem stanovit životnost uzlu. Na obr. 9 jsou uvedena zbytková napětí po opravě reaktoru jaderné elektrárny. Cílem numerické analýzy byla validace technologického postupu opravy, potvrzení její proveditelnosti z hlediska napěťových stavů a materiálové struktury. Posouzení trhliny ve svarovém spoji tlakové nádoby reaktoru je uvedeno na obr. 10. Celý projekt byl provedena v několika krocích. Nejdříve byla provedena numerická analýza svařování, aby bylo obdrženo rozložení zbytkových napětí a plastických deformací po výrobním procesu, dále bylo uvedené místo zatíženo provozními parametry. Posléze byla vytvořena v konstrukci, resp. ve výpočetním modelu trhlina, která byla posouzena na limitní stavy. Na obr. 11 jsou uvedeny predikce šíření trhlin v nátrubku tlakové nádoby reaktoru pro dvě různé počáteční velikosti a dále pro různé zatěžovací režimy v průběhu 30 let provozu.
- 4. Virtuální realita.** Jde o velmi výkonný softwarový produkt, který zobrazuje trojrozměrný model virtuálního prototypu v jeho reálných rozměrech a znázorňuje jeho chování v reálném čase. Virtuální reality je využívána pro posuzování konstrukčních návrhů, vyhodnocování a optimalizaci montážních a demontážních procesů, pro ověřování technických prostředků a nástrojů pro výrobu, údržbu a opravy. Dále je umožněno během simulací montáže, údržby a oprav odhalovat kontakt a kolizní oblasti pevných částí a okamžitě vyhodnocovat chování flexibilních komponent, dále představuje podporu pro vyhotovení technické dokumentace a animací pro nácvik pracovních postupů. V oblasti energetiky používají virtuální realitu společnosti jako jsou SIEMENS, AREVA, HITACHI především na ověření výrobních postupů a ověření proveditelnosti údržby a oprav.

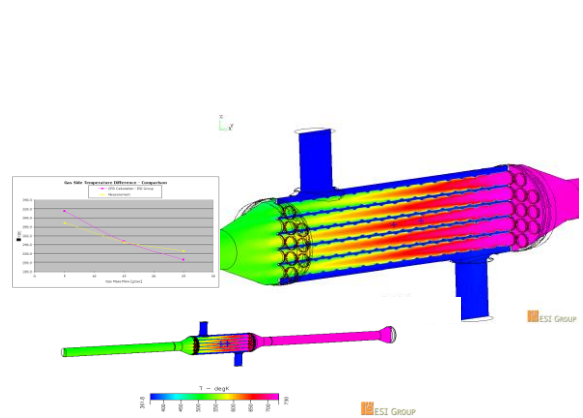
**5. Systém modeling** Program SimulationX, obr. 12, je intuitivní softwarová platforma pro modelování fyzikálních závislostí, simulaci a analýzu mechatronických systémů. Inženýři, nejen z oblasti energetiky, důvěřují uvedenému řešení při návrhu a virtuálním testování elektrických, mechanických, tepelných či tekutinových systémů a jejich kombinací. Programové řešení jim umožňuje pochopit chování jednotlivých komponent v rámci systému a optimalizovat finální projekt s ohledem na scénáře skutečného zatížení, které je dynamické, v čase proměnné. Ať už jde o eliminaci vibrací v pohonném ústrojí turbín, návrh efektivních topných a chladicích okruhů, jednotek pro ukládání energie nebo tzv. virtuální elektrárny a lze vyhodnocovat, jak zcela nová nekonvenční řešení, tak i optimalizovat řešení stávající. Chceme-li jmenovat oblasti, ve kterých nachází SimulationX nejrozsáhlejší uplatnění, jsou to zejména analýzy dynamického chování parogenerátorů, chlazení, sušení vzduchu a zpětného získávání odpadního tepla. Dále pak porovnávání vlastností různých variant složitých systémů, jako jsou např. nabíjecí a vybíjecí charakteristiky mechanických, tepelných, tekutinových a chemických akumulátorů. Nesmíme opomenout ani oblast optimalizace řídicích algoritmů pro systémy kombinované výroby tepla a elektřiny nebo pro výrobu, skladování a spotřebu obnovitelných energií. Pomocí softwarové platformy SimulationX je možné provádět bezpečnostní analýzy a studie spolehlivosti pomocí analýzy stromu poruchových stavů (FTA) a analýzy příčin a důsledků (FMEA) na základě fyzické struktury modelu. Přínosem je samozřejmě i možnost identifikace slabých míst a ztrát v celém modelovaném systému a maximalizace jeho celkové účinnosti.

## **Závěr**

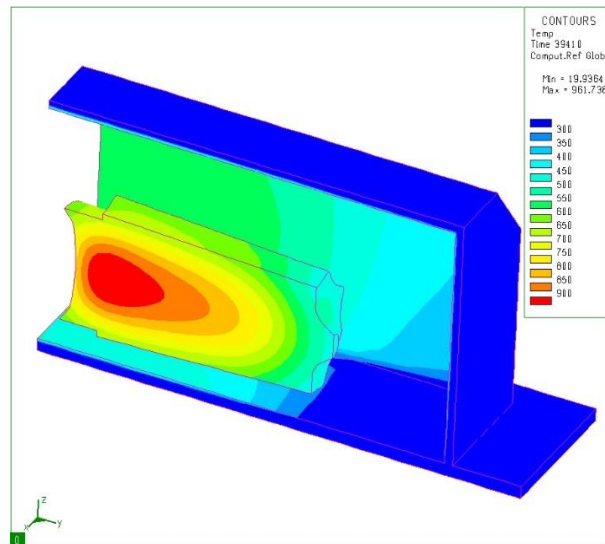
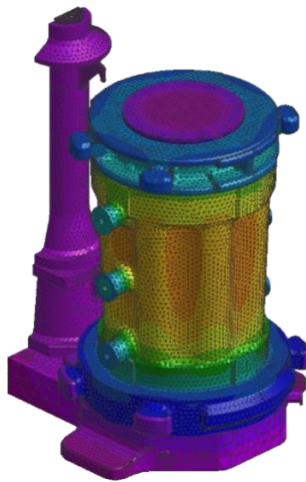
ESI Group má dlouholeté zkušenosti v oblasti poradenství a inženýrských služeb v oblasti energetiky zajišťovaných po celém světě. Výsledkem spolupráce s předními společnostmi energetického průmyslu jsou metodiky se specifickým produktově-procesním přístupem, a přitom v souladu se zavedenými standardy. Pro splnění přísných požadavků kladených na energetická zařízení, ESI Group nabízí řešení, založené na přesné kalibraci modelů reprezentativních vzorků a využití dat pro analýzu finálního konstrukčního řešení. Uvedený přístup se opírá o realistické zohlednění fyziky materiálu v modelech sestavených se zohledněním výrobních procesů, jaké absolvovala reálná konstrukce a se zatížením, které odpovídá reálným, popř. mezním provozním podmínkám. Na základě numerických simulací je u klíčových rozhodnutí, která poskytují významné navýšení spolehlivosti, produktivity, či zavedení inovací, možné posoudit míru konzervatismu, se kterou jsou přijata, při současném zajištění patřičné úrovně bezpečnosti.



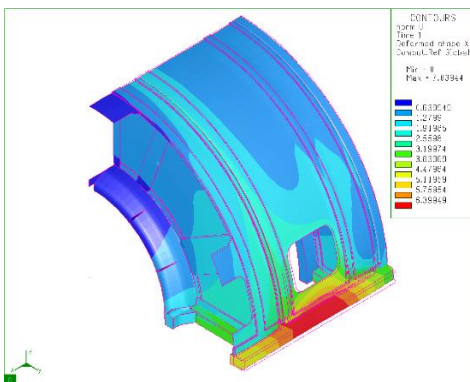
Obr. 1: Napětí v nátrubku



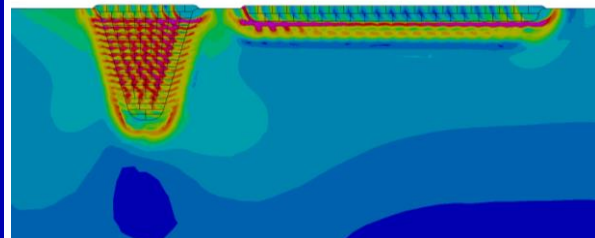
Obr. 2: Analýza účinnosti tepelného výměníku



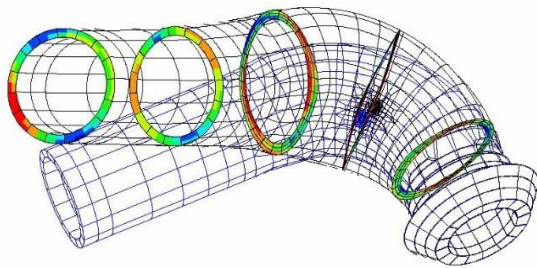
Obr. 3 a obr. 4: Posouzení/optimalizace technologie odlévání ingotu



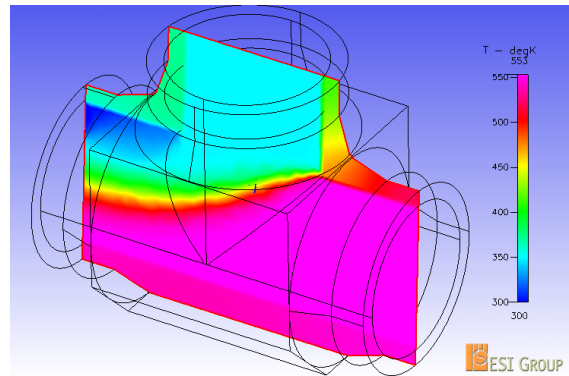
Obr. 5: Predikce deformací tělesa turbíny



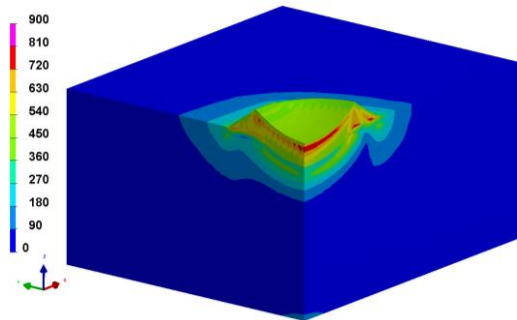
Obr. 6: Oprava turbínového tělesa



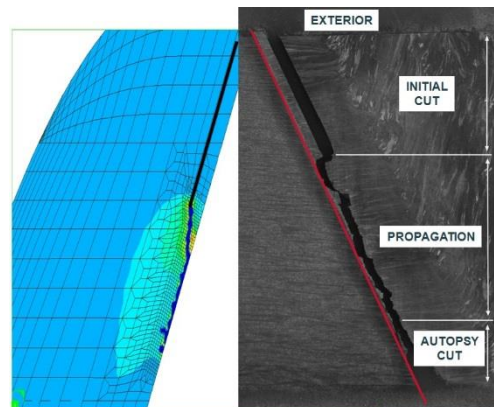
Obr. 7: Simulace ohybu trubky



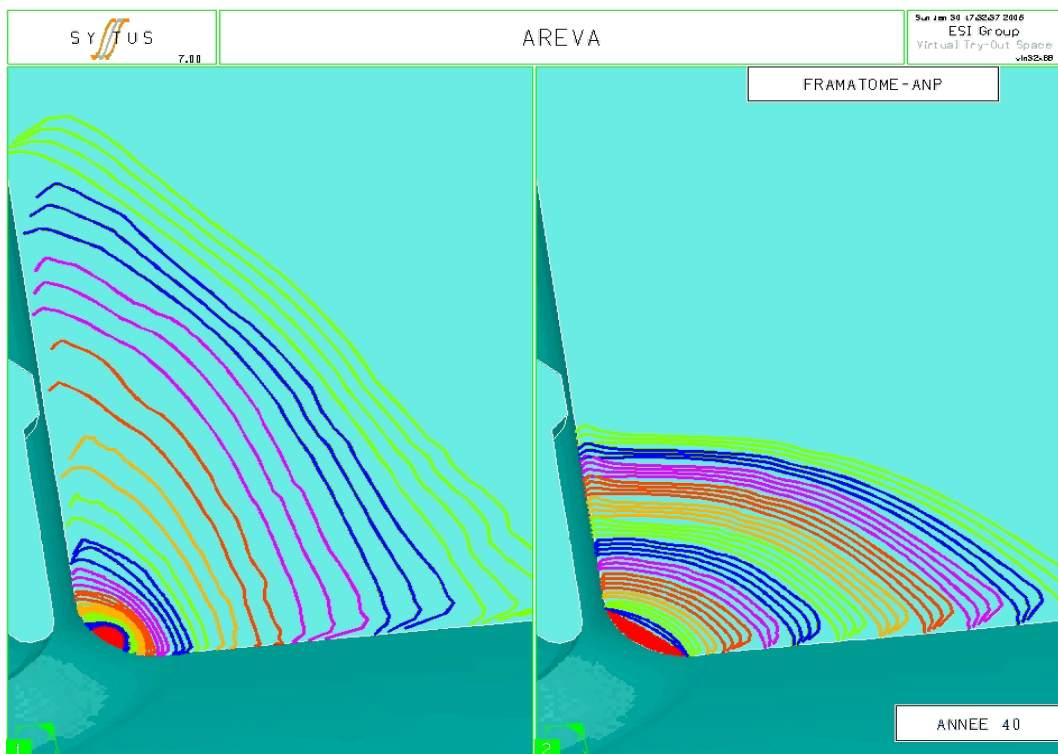
Obr. 8: Vyhodnocení průběh teplot T-spoje



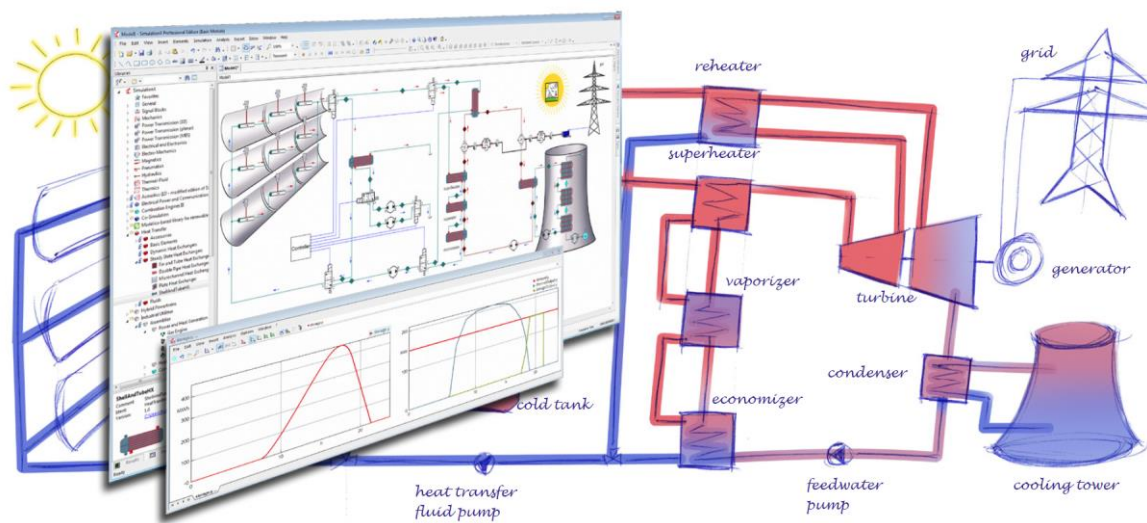
Obr. 9: Zbytkové napětí po opravě



Obr. 10: Posouzení vady ve svarovém spoji



Obr. 11: Predikce šíření vady v nátrubku reaktoru



Obr. 12: Systém modeling – Simulation X

# **ODBĚR VZORKŮ NÁVARU Z VNITŘNÍHO POVRCHU TNR 3. BLOKU JE DUKOVANY PRO HODNOCENÍ RADIČNÍHO POŠKOZENÍ**

## **SAMPLING OF REACTOR PRESSURE VESSEL INNER CLADDING FOR RADIATION DAMAGE EVALUATION OF DUKOVANY NPP UNIT 3**

Radek Konop a Petr Šmolík

ŠKODA JS a.s.

### **Abstrakt**

Pro hodnocení stavu a životnosti tlakové nádoby reaktoru z hlediska radiačního poškození, resp. zkrěhnutí se používá kombinace výpočtů a experimentálních metod, jejichž cílem je stanovení fluence rychlých neutronů. Mezi experimentální metody patří kromě jiného odběr vzorků návaru z vnitřního austenitického návaru tlakové nádoby reaktoru ve formě drobných kovových třísek, u nichž se následně stanovuje aktivita. Prezentovaný příspěvek přináší informaci o přípravě a realizaci odběru vzorků návaru na 3. bloku JE Dukovany v roce 2017.

### **Abstract**

The combination of calculations and experimental methods for the fast neutron fluence assessment is basis for lifetime evaluation of reactor pressure vessel. Sampling of reactor pressure vessel inner cladding belongs among these experimental methods. This paper presents information about the preparation and realization of sampling on NPP Dukovany Unit 3.

### **Obecný popis odběru vzorků návaru**

Účelem provedení odběru vzorků materiálu z návaru TNR 3. bloku EDU je zpřesnění stanovení fluencí rychlých neutronů dopadajících na TNR reaktorů VVER-440, kvalifikace výpočtů fluence v axiálním maximu fluence a v rovině svaru č. 3 (5/6) a rovněž kvalifikace výpočetních postupů pro stanovení fluencí neutronů v oblastech nad AZ reaktoru VVER 440. Přesnost stanovení fluence rychlých neutronů je jedním z nejdůležitějších faktorů při hodnocení zbytkové životnosti TNR.

Odběr vzorků vnitřního návarového kovu TNR je v současnosti jedinou ověřenou možností, jak získat přímé experimentální výsledky o hustotě toku a fluenci neutronů na vnitřní stěně TNR. První odběr byl proveden na stejné TNR v roce 2005 v rámci projektu VaV dotovaného SÚJB. Druhý odběr byl pak proveden o 3 roky později na TNR 2. bloku Arménské JE již jako komerční zakázka.

Odběr vzorků návaru byl proveden pomocí jednoúčelového modulu OVZ, který je namontován na manipulátor provádějící provozní kontroly TNR z vnitřní stěny. Veškeré informace o vývoji modulu OVZ a provedení odběru vzorků návaru na JE Dukovany v roce 2005 jsou uvedeny v závěrečné zprávě projektu [1].

Modul OVZ odebírá třísky návaru postupným odfrézováním materiálu pomocí tvarové dvoubřité čelní frézy. Odebírání třísek probíhá pod vodou a třísky jsou odsávány do zásobníků modulu OVZ. Uvnitř zásobníku je umístěno sítko, na němž se zachytávají třísky. Modul je schopen na jedno nasazení odebrat vzorky až z 8 různých míst na TNR. Hloubka drážek je plánována maximálně 0,8 mm, šířka 4 až 5 mm je dána hloubkou drážky a tvarem frézy. Délka drážek v roce 2005 byla cca 80 mm, pro odběr v roce 2017 byly zvoleny dvě délky – 50 a 80 mm. Schematicky je modul OVZ v TNR zobrazen na obr. 1.

V rámci ověřovacích zkoušek před prvním odběrem v roce 2005 byla ověřena účinnost zachytu třísek a vyhodnocena na více než 90 %.



Před vlastním odběrem se provádí kontrola míst odběru za účelem vyloučení necelistvosti v okolí budoucích drážek. Po odběru se pak provádí vizuální nepřímá kontrola s rozměrovou kontrolou a kontrola vířivými proudy nových drážek a vybraných původních drážek.

Po odběru materiálu byla fluence neutronů v místě odběru stanovena z měřené aktivity izotopů Fe, Ni a Nb 93 ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. Prahové reakce na Fe a Ni budou využity k ocenění správnosti koeficientů zeslabení hustoty toku neutronů přes stěnu TNR, prahová reakce na Nb 93 pak ke stanovení fluence za celou dosavadní dobu provozu reaktoru.

### **Příprava na odběr vzorků**

V první řadě bylo nutné stanovit počet a umístění drážek, resp. odebíraných míst. Výběr míst provedla společnost Centrum výzkumu Řež, s.r.o. jako objednatel odběru a jako společnost, která provádí měření aktivit odebraných vzorků a hodnotí fluenci rychlých neutronů. Místa byla zvolena s ohledem na 8 drážek vzniklých při odběru v roce 2005 na stejném, tedy 3. bloku JE Dukovany. Počet byl stanoven na 16, tzn., že odběr musel být proveden na dvakrát (modul OVZ může odebrat na jedno ponoření vzorky maximálně z 8 míst).

Nedílnou součástí přípravy na odběr vzorků bylo vypracování rozsáhlé dokumentace, kterou v rámci žádosti o povolení odběru předkládala na SÚJB společnost ČEZ, a.s. jako provozovatel zařízení. Mezi základní dokumenty patřily kromě jiného

- výpočtová zpráva o vlivu drážek v návaru TNR EDU na únavové poškození a na odolnost proti náhlému lomu [2],
- technologický postup pro odběr vzorků návaru,
- plán kontrol a zkoušek.

Prvním důležitým výstupem zprávy bylo stanovení minimální přípustné vzdálenosti mezi drážkami a to 2,4 mm. Pro tuto vzdálenost mezi drážkami v axiálním směru TNR dochází k zanedbatelné změně velikosti a rozložení napětí v drážce a jejím okolí. Pro vlastní odběr byla konzervativně předepsána minimální vzdálenost mezi drážkami 20 mm. Dále bylo ve zprávě konstatováno, že

- ve všech výpočtových bodech je se značnou rezervou splněna podmínka  $D < 1$  pro kumulativní únavové poškození,
- výpočtový bod, kde kumulativní únavové poškození dosahuje svého maxima,  $D = 0,107204$  pro 60 let provozu se nachází ve vrcholu drážky,
- vzhledem ke skutečnosti, že existence drážky mírně snižuje napjatost na rozhraní mezi návarem a základním materiálem v oblasti pod drážkou, vliv drážky na únavové poškození na rozhraní je nulový,
- odolnost TNR proti náhlému lomu není ovlivněna vytvořením drážek, a tedy zbytková životnost TNR není dotčena.

Samozřejmou součástí přípravy bylo provedení zkoušek tvarových fréz a ověření funkčnosti modulu OVZ pro odběr vzorků návaru. Před vlastními zkouškami bylo provedeno několikanásobné ověření funkčnosti modulu OVZ na suchu i pod vodou. Poté byly provedeny zkoušky celkem pěti kusů tvarových fréz, které byly připraveny pro vlastní odběr na TNR 3. bloku JE Dukovany. Podstatou zkoušek tvarových fréz je především ověření, že nástroj na dně drážky nevytvoří patrnou ostrou stopu po špičce ostří frézy a nevykazuje na svém ostří viditelné stopy otupení nebo špatné geometrie nabroušení. Zkoušky tvarových fréz byly úspěšné. Poté byl rovněž úspěšně proveden zkušební odběr ve společnosti ŠKODA JS a.s. v Plzni před zástupci společností ČEZ, a. s., ÚJV Řež, a.s. a Centrum výzkumu Řež s.r.o.

## Realizace odběru vzorků návaru

Před vlastním odběrem byly provedeny NDT kontroly za účelem vyloučení necelistvostí v místech původních drážek z roku 2005 a v místech plánovaných drážek. Protokoly z těchto zkoušek byly vyhovující (zkouška vířivými proudy 24 míst drážek a celé TNR, zkouška ultrazvukem rozhraní návaru a základního materiálu TNR a zkouška vizuální nepřímá vnitřního povrchu TNR).

Dne 12. 9. 2017 byl odběr vzorků zahájen frézováním drážky č. 1 s nastavením hloubky frézování 0,49 mm. Během frézování bohužel došlo k poruše snímače polohy modulu OVZ a tím k vytvoření drážky o celkové délce 91,8 mm, tj. o 41,8 mm delší než plánovaná délka.

Na základě této události byl odběr zastaven a společnost ŠKODA JS byla vyzvána k vyjádření se k poruše modulu OVZ s navržením nápravných opatření pro odběr dalších drážek a k možnému vlivu delší drážky na výsledky provedených výpočtů. Obsahem stanoviska společnosti ŠKODA JS bylo, že po selhání automatizovaného režimu frézování je možné odběr vzorků dokončit v manuálním režimu s tím, že došlo ke zkrácení plánované délky drážky o 10 mm. Ohledně výpočtu bylo konstatováno, že změna délky drážky nemá vliv na výsledky a závěry uvedené ve výpočtové zprávě. Současně byly provedeny kontroly drážky č. 1 a to s vyhovujícím výsledkem pro kontrolu vířivých proudů a s výsledkem „k posouzení“ pro vizuální nepřímou kontrolu s rozměrovou kontrolou drážky.

Dne 13. 9. 2017 bylo rozhodnuto o pokračování odběru vzorků drážek 2 až 8 se zmenšenou hloubkou frézování 0,45 mm. Byla provedena kontrola funkčnosti modulu OVZ a v manuálním režimu byla vyfrézována další drážka. Po kontrole této drážky vířivými proudy a vizuální nepřímou kontrolou s rozměrovou kontrolou s vyhovujícím výsledkem, byly odebrány zbylé vzorky první sady osmi drážek.

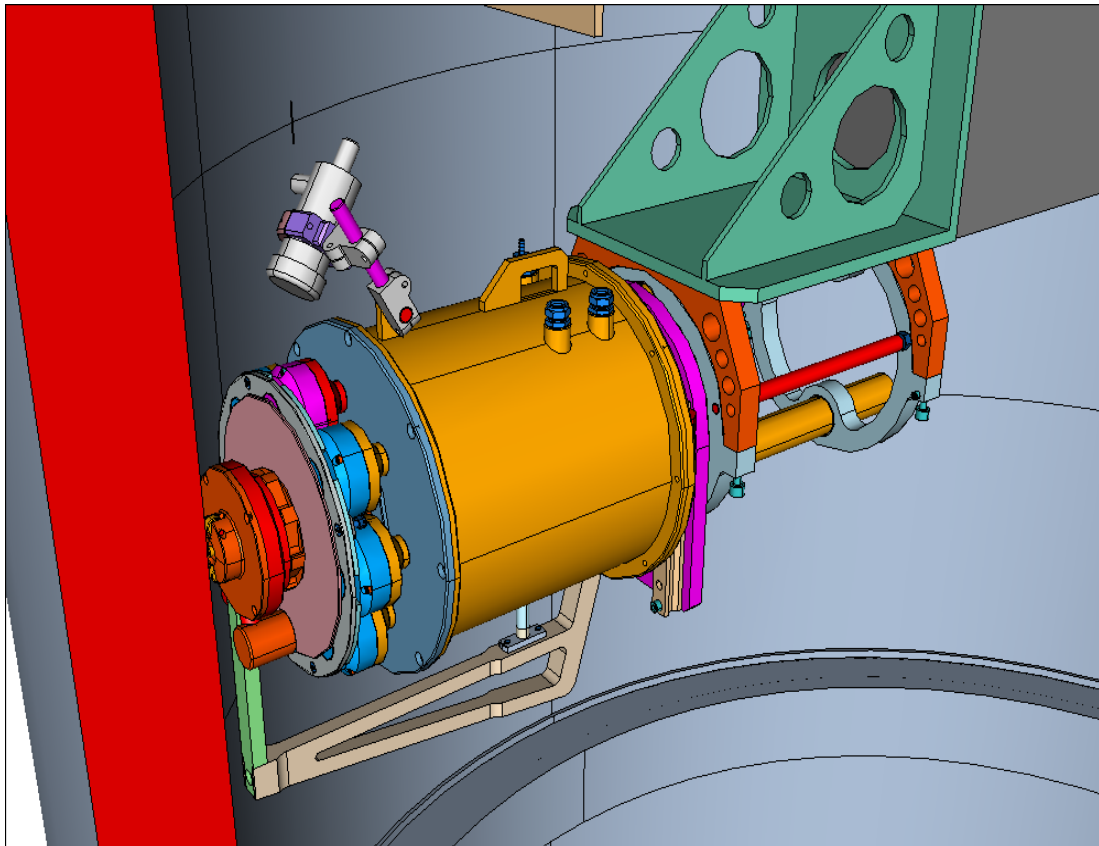
Dne 14. 9. 2017 byla provedena demontáž zásobníků modulu OVZ. Otevřené zásobníky s třískami byly vysušeny pod lampou, poté byly třísky vyjmuty a nasypány do předem označených ampulí a ty byly okamžitě uloženy do transportního kontejneru.

Před odběrem druhé sady vzorků návaru byly zásobníky vyčištěny a byla v nich vyměněna sítko. V modulu OVZ byla vyměněna fréza za novou a nastavena hloubka frézování opět 0,45 mm. Po opakovaném ověření funkčnosti modulu OVZ byly odebrány všechny plánované drážky druhé sady (drážky 9 až 16). Opět byly provedeny kontroly nových drážek a drážek původních z důvodu prokázání jejich neovlivnění novým odběrem. Jednalo se o kontrolu vizuální nepřímou s rozměrovou kontrolou drážek a mezer mezi původními a novými drážkami a o kontrolu vířivými proudy původních drážek z roku 2005 a nových drážek. Všechny kontroly byly s vyhovujícím výsledkem.

Součástí kontrol po odběru všech drážek byla také kontrola čistoty TNR. Nezachycené třísky byly následně v rámci plánovaného čištění dna TNR odstraněny.

## Závěr

Kromě délky drážky č. 1 nepřekročily rozměry drážek plánované rozměry. Hloubka nepřesáhla limitní hodnotu 0,8 mm i kvůli nastavení hloubky frézování na 0,45 mm. Pro drážku č. 1 byla hloubka frézování 0,49 mm. Hmotnosti odebraných třísek jsou pro všechny drážky a plánované analýzy ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. dostatečné. Všechny podrobnosti jsou pak shrnuty v závěrečné zprávě k odběru vzorků návaru na 3. bloku JE Dukovany v roce 2017 [3].



Obr. 1: Modul OVZ v poloze prováděného odběru v TNR

## Literatura

- [1] Hógel, J., Brynda, J. a spol. (2005): *Závěrečná zpráva o řešení projektu VaV 01/04 „Odběr vzorků materiálu z vnitřku tlakové nádoby energetického reaktoru pro určení fluence rychlých neutronů“*, Ae 11810/Dok. Plzeň: ŠKODA JS a.s.
- [2] Lopaur, J., Macák, P. (2017): *Vliv drážek v návaru TNR EDU na únavové poškození a na odolnost proti náhlému lomu*, Ae 17022/Dok. Plzeň: ŠKODA JS a.s.
- [3] Konop, R., Šmolík, P. (2017): *Odběr vzorků návaru TNR 3.bloku JE Dukovny v roce 2017, technická zpráva*, Ae 17286/Dok, Rev.0. Plzeň, ŠKODA JS a.s.

# VÝVOJ PERSPEKTIVNÍCH NEDESTRUKTIVNÍCH METOD

## DEVELOPMENT OF PERSPECTIVE NONDESTRUCTIVE METHODS

Jaroslav Brom a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

### Abstrakt

V příspěvku jsou diskutovány aktuální nebo připravované projekty Centra výzkumu Řež pro oblast perspektivních nedestruktivních (NDT) metod jako např. využití metod nelineární ultrazvukové spektroskopie a magnetické paměti zařízení jako skenovacích metod pro zjišťování trhlin v potrubních úsecích pro vytipování svarových spojů s potenciální trhlinou, vývoj on-line ultrazvukového systému do vysokých teplot pro monitorování vzniku nebo rozvoje trhlin ve svarových spojích, validace SW CIVA pro materiály VVER s následným využitím pro ultrazvukovou metodu v oblastech virtuálních zkušebních těles, provádění 3D skenování povrchů a měření rozměrů v nepřístupných místech z důvodu vysoké radiace, kontroly ozářených betonů.

### Abstract

This paper discusses current or upcoming projects of the Research Centre Rez for the field of perspective NDT methods such as the use of nonlinear ultrasonic spectroscopy methods and magnetic memory of the equipment as scanning methods for detecting cracks in the pipeline sections for the selection of welded joints with a potential crack, development of on-line ultrasonic system to high temperatures to monitor the formation or development of cracks in welded joints, validation of SW CIVA for VVER materials with subsequent use for ultrasonic method in areas of virtual test pieces, 3D surface scanning and measurement of dimensions in unacceptable places due to high radiation, inspections of irradiated concrete.

### Prostředí – současný stav

Vývoj a výzkum perspektivních NDT metod je řešen v rámci stávajících projektů CVŘ nebo bude řešen v rámci připravovaných VaV projektů pro národní centrum kompetence (v rámci NCK – Energetika) nebo TAČR Théta 2. výzva.

Pro odhalení a případně pro monitorování rozvoje trhlin, opotřebení ve strojních zařízeních implementuje provozovatel program provozních kontrol a program údržby, u nichž metody zkoušení, četnost a rozsah kontrol vychází z provozních zkušeností a z rizikového hodnocení komponent.

V rámci níže uvedených VaV projektů probíhá nebo proběhne výzkum a vývoj perspektivních nedestruktivních metod, jejichž použití bude využitelné v rámci programu provozních kontrol elektráren:

#### **Výzkum a vývoj nových perspektivních metod pro detekci defektů ve svarových spojích**

V dnešní době se kontrola svarových spojů na přítomnost provozních defektů typu trhlina a monitorování jejich změn provádí ultrazvukovou metodou (UT) nebo v některých případech radiografickou metodou (RT). Další možností je využití měření akustické emise při pevnostních tlakových zkouškách.

V případě existence kvalitativní metody, která by zjistila vznik a změny typu trhlina ve svarových spojích v určité části potrubního systému nebo pomocí které by se kontrola na přítomnost a změny trhlin mohla provádět přes izolaci nebo rychlejším způsobem oproti klasickým metodám, by se mohly objemové kontroly svarových spojů jako např. metodou UT nebo RT (pro potvrzení detekce trhlin, stanovení rozměrů a polohy trhlin apod.) provádět jen v již vytipovaných svarových spojích.

## **Výzkum a vývoj v oblasti simulací trhlin ve svarových spojích prostřednictvím SW nástrojů**

V dnešní době je ve světě kladen důraz na modelování a simulování NDT trhlin a pravděpodobnosti detekování trhlin (Probability Of Detection). V ČR se SW nástroje používají zejména pro optimalizaci sond a inspekčních postupů. Výzkum a vývoj proběhne pro materiály a komponenty českých JE.

### **Výzkum a vývoj v oblasti stanovení rozměrů v místech se zvýšenou radiací**

Změna vůle mezi perem tlakové nádoby reaktoru a drážce šachty reaktoru může vést k nežádoucím vibracím za jejich provozu. Stanovení rozměrů v místě se zvýšenou radiací vyžaduje výzkum a vývoj měřicího zařízení včetně jeho kvalifikování na podmínky prostředí.

### **Výzkum a vývoj on-line ultrazukového diagnostického systému pro monitorování stavu a rozvoje trhlin svarového spoje za provozu**

V dnešní době se provádí monitorování rozměrů trhlin při odstaveném zařízení, s umožněným přístupem ke komponentě za podmínek vhodných pro provedení plnohodnotné kontroly. Při tomto způsobu provádění kontrol nelze zjišťovat provozní režimy/stavy, kdy dochází k rozvoji trhliny nebo jen velmi omezeně. Za provozu lze např. metodou akustické emise monitorovat existenci emisních událostí, ze kterých lze usuzovat na kvalitativní změny v místě trhliny. Přímé měření svarového spoje a stanovení okamžiku vzniku, resp. rozvoje defektu pomocí diagnostického systému umožní provozovateli elektrárny přijmout opatření k eliminaci nebo omezení nežádoucích jevů.

### **Výzkum a vývoj použití metod nelineární akustické emise nebo vyhodnocování šumů neutronového toku z ionizačních komor na detekování trhlin v ozářeném betonu.**

V dnešní době neexistují použitelné nedestruktivní metody na monitorování trhlin v ozářeném betonu.

### **Výzkum a vývoj pro zjišťování plošné 3D profilometrie vnitřního povrchu**

Při stanovování tloušťky potrubních systémů se v dnešní době používá ultrazuková metoda, měření jsou prováděna bodově nebo v liniích bez vztahu k vnějšímu profilu. Měření tloušťky se současným využitím zařízení pro měření 3D vnějšího profilu se neprovádí.

## **Přínosy a užitek z projektů**

Nové technologie a přístupy pro zajištění bezpečného a spolehlivého dlouhodobého provozu jaderných a klasických zdrojů elektrické energie v ČR a v zahraničí (SR, Maďarsko apod.). V jednotlivých oblastech projektu se jedná o následující přínosy:

- a) Při prokázání vhodnosti metody nelineární spektroskopie elastických vln pro aplikování na JE nebo KE pro účely detekování změn typu trhliny ve svarových spojích potrubních systémů může každoroční měření při odstávce bloku JE nebo KE bez nutnosti drenážování potrubních tras, demontování izolací apod. provést zmonitorování velkého rozsahu potrubního systému nacházejícího se v prostoru mezi snímači. Na JE Temelín se v případě použití snímačů a tras systému LEMOP a ACMS jedná o hlavní cirkulační potrubí a připojená potrubí po první uzavírací armaturu. Na KE bude použít této metody zejména u svarových spojů parovodů.
- b) Vyvinutá metodika na validaci použití SW CIVA na simulování trhlin v materiálech 22K povede k určení simulovaných odezev na ultrazukový signál pro různé velikosti defektů. Toho bude možno využít:
  - ke zpřesnění stanovení rozměrů trhlin ve svarových spojích při reálných měřeních.
  - při kvalifikování inspekčních postupů, kdy praktické zkoušky budou moci proběhnout na větším počtu vad (vedle vad nacházejících se ve vyrobených zkušebních tě-

lesec tak i na simulovaných vadách). Tímto využitím simulací bude rovněž možno snižovat náklady na výrobu zkušebních těles.

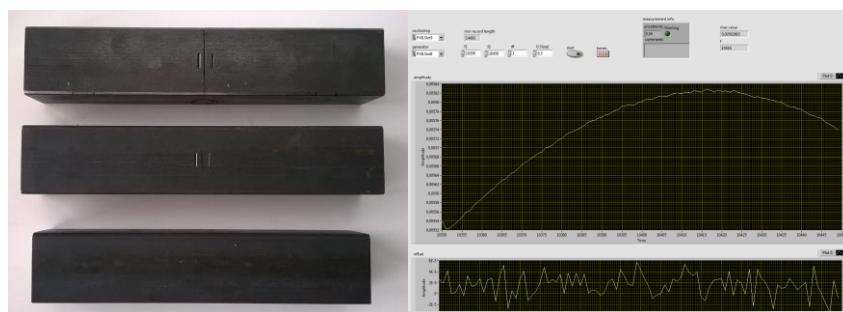
- k tréninku a udržování způsobilosti defektoskopických pracovníků.
- Nově vyvinuté zařízení na měření rozměrů per tlakové nádoby reaktoru a drážek šachty reaktoru v místech s vysokou radiací bude možno využít pro stanovení aktuálních vůlí per a drážek s možností jejich porovnání s výchozím a projektovým stavem. Při opakovaných měřeních bude možno stanovit jejich případný trend.
  - Experimentálně ověřený on-line ultrazvukový diagnostický systém bude možno využít pro monitorování a predikci stavu kritických svarových spojů s provozní vadou (trhlinou vycházející z vnitřního povrchu) za provozu technologického systému, ve kterém se svarový spoj nachází. Diagnostický systém musí být provozuschopný za vysokých teplot do 330 °C a v případě jaderných elektráren i v radiačním prostředí.
  - V případě ověření bude možno využít navrhované nedestruktivní metody ke stanovení stupně degradace betonů v betonové šachtě reaktoru typu VVER.
  - Nově vyvinuté metody plošné 3D profilometrie vnitřního povrchu vč. rozložení tloušťek bude možno využít např. při porovnání skutečného a projektového vnějšího a vnitřního profilu nebo bude moci sloužit k vyhodnocování změn strojních komponent na vnitřním povrchu např. z důvodu vnitřní plošné koroze nebo eroze nebo v souvislosti se změnami z důvodu tečení materiálu apod.

### Definice výstupů z projektů

- Užitný vzor na použití metody NEWS pro detekci a sledování rozvoje trhlin.
- Normativní dokument pro validaci použití SW CIVA na simulování trhlin v materiálech 22K v NTD A.S.I. Sekce VII.
- Prototyp zařízení na měření rozměrů v místech s vysokou radiací.
- Výstupem z této části bude užitný vzor.
- Výstupem bude ověřená nedestruktivní metoda.
- Výstupem bude prototyp zařízení.

### Závěr

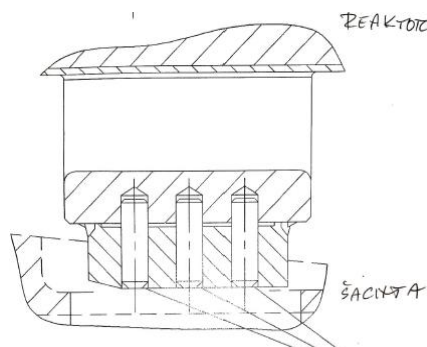
V článku jsou diskutovány aktuální nebo připravované projekty Centra výzkumu Řež pro oblast perspektivních nedestruktivních metod, které po jejich realizaci mohou přispět k lepší kontrolovatelnosti stavu komponent a tím i ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti elektráren.



Obr. 1: Zkušební tělesa pro ověřování metody NEWS a výstupní obrazovka z ověřování

Tabulka 1: Výstupy z ověřování metody NEWS na zkušebních tělesech z obr. 1

napětí (V)	VV4 (otevřená trhлина)		VV8 (zavřená trhлина)		VV12 (bez trhliny)	
	u drážky (Hz)	pod drážkou (Hz)	u drážky (Hz)	pod drážkou (Hz)	u drážky (Hz)	pod drážkou (Hz)
abs. změna	6	3	27	17	5	0
rel. změna	0,07%	0,04%	0,27%	0,17%	0,05%	0,00%



Obr. 2: Schématický výkres pera na tlakové nádobě reaktoru a drážky na šachtě reaktoru



Obr. 3: Příklad chlazeného klínu a zobrazení experimentální sestavy na měření PAUT při vysokých teplotách

## Literatura

[1] EPRI document 3002010302 *High-Temperature Nondestructive Evaluation Development and Application*.

## 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.



# MODERNÍ DIAGNOSTIKA PRO MONITOROVÁNÍ DEFORMACÍ VYSOKOTEPL�의NÍCH 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 používané 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

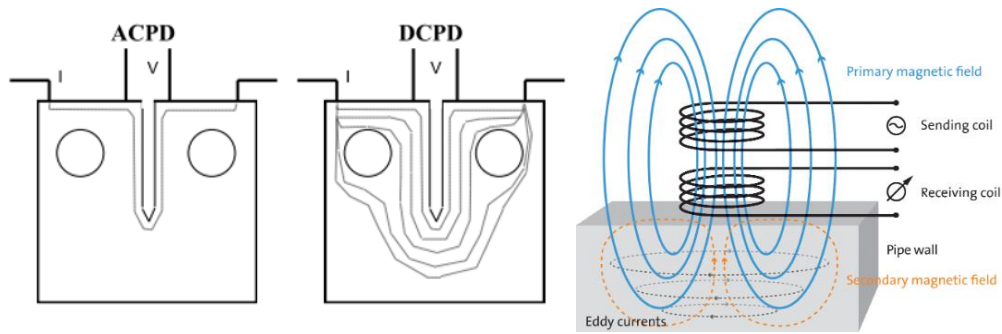
$$\varepsilon_i = \frac{S_i^0}{S_i} - 1, \quad (2)$$

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.

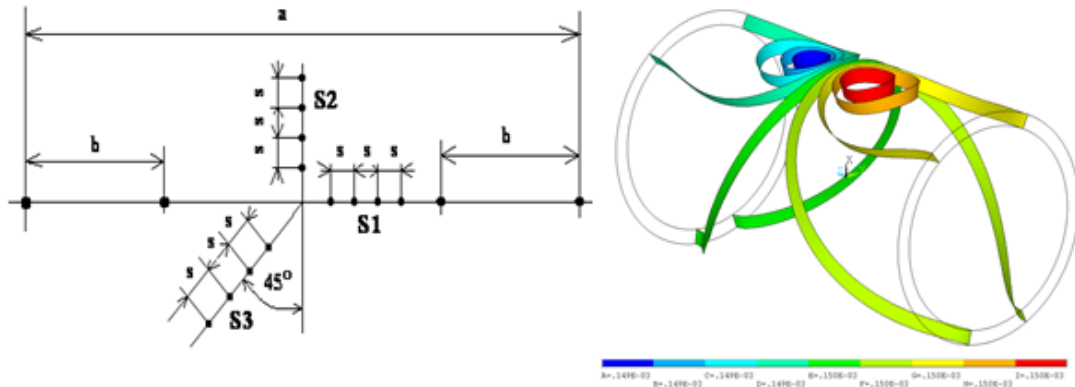
## Tabulky a obrázky



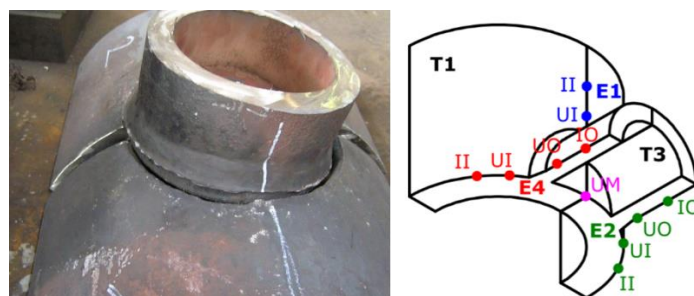
Obr. 1: Snímek vlevo – trajektorie protékajícího proudu v okolí trhliny zkušební vzorku při aplikování střídavé (ACPD) (snímek vlevo) či stejnosměrné (DCPD) (snímek vpravo) potenciálové metody [3]. Snímek vpravo – schéma principu metody vířivých proudů pro diagnostiku materiálů [1].

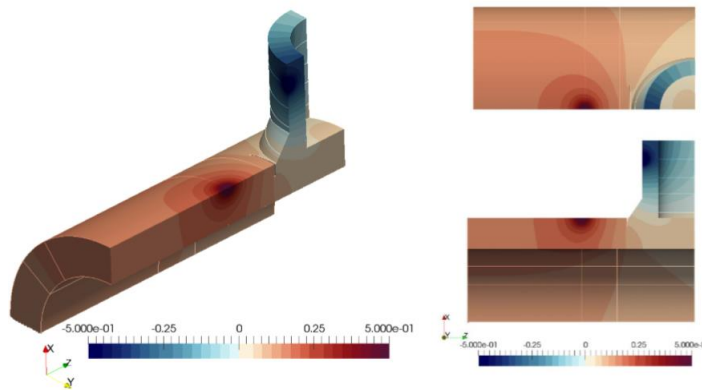
Tabulka 1: Základní průběhy elektrického potenciálu  $U(x)$  v závislosti na vzdálenosti  $x$  od proudové elektrody.  $I_M$  je měřící proud,  $\rho$  je měrný odpor materiálu,  $S$  je příčný průřez materiálu.

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

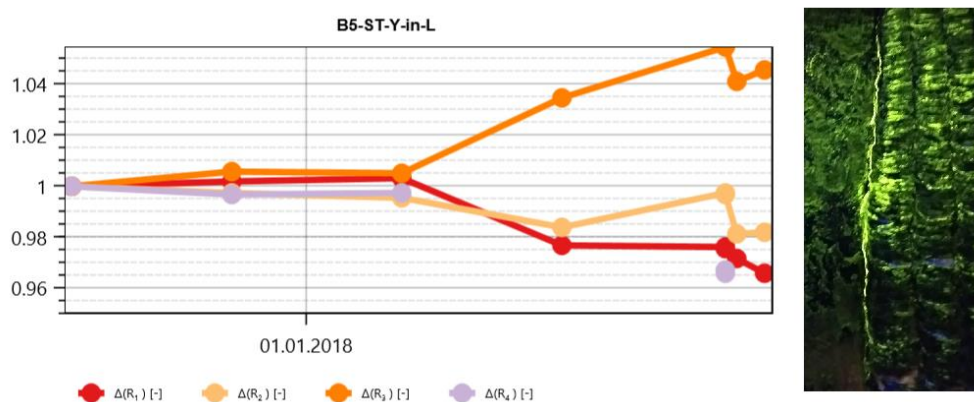


Obr. 2: Příklad uspořádání elektrodového systému pro monitorování deformací vysokoteplotních komponent, snímek vlevo. Snímek vpravo – vizualizace obecného potenciálového pole reprezentujícím MKP modelem o parametrech válcové trubky reprezentující reálný kus parovodu – software Ansys, [8].





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\\_aeronautics.htm](http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics.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*.

# DEFEKTOSKOPIE NEBO DEFEKTOMETRIE?

## DEFECTOSCOPY OR DEFECTOMETRY?

Jan Vít, Lukáš Stainer a Zdeněk Skála

ŠKODA JS a.s.

### Abstrakt

Požadavky na výsledky nedestruktivních kontrol (NDT) se neustále zvyšují. V současné době se jako výstup zpravidla očekává určení rozměrů necelistvostí, a ne pouze určení rozměrů indikací nebo jiných imaginárních údajů (rozměrů). Někteří proto přejmenovávají defektoskopii na defektometrii. Příklady méně známých způsobů určování rozměrů necelistvostí a zajímavé kombinace různých metodických přístupů k této problematice v novém ruském předpisu NP-084-15 jsou hlavní náplní příspěvku.

### Abstract

The demands on results of NDT inspections are increasing continually. The determination of discontinuity dimensions is expected as an output at present time, not only the dimensions of indication or other imaginary values. So some people rename the defectoscopy to defectometry. Examples of less known ways of discontinuity dimensions determination and interesting combinations of different methodological approaches to this issue in the new Russian regulation NP-084-15 are the main contents of this paper.

### 1. Úvod

Vývoj metod a technik NDT lze názorně ukázat na ultrazvukovém zkoušení austenitických a heterogenních svarových spojů. Před lety se s tímto zkoušením vůbec nepočítalo, a proto většina předpisů (např. PK 1514-72 [1]) logicky neobsahuje žádná kritéria pro hodnocení ultrazvukového zkoušení. Dnes se ultrazvukem zkoušejí všechny typy svarových spojů, a to přináší vyšší nároky nejen na zkušební techniky, ale i na vyhodnocení a interpretaci výsledků.

### 2. Nedestruktivní zkoušení

Postup provedení a vyhodnocení provozních nedestruktivních zkoušek můžeme zjednodušeně popsat v šesti fázích (není uvedena nezbytná etapa přípravy zkoušení):

- **Detekce.**  
Zjištění přítomnosti necelistvosti a určení jejích základních parametrů podle použité metody (techniky) NDT.
- **Lokalizace.**  
Určení polohy (souřadnice) necelistvosti.
- **Klasifikace.**  
Stanovení typu, tvaru a orientace necelistvosti.
- **Sizing.**  
Určení rozměrů necelistvosti, včetně jejího ligamentu, tj. nejkratší vzdálenosti k nejbližšímu povrchu zařízení.
- **Schematizace.**  
Detekované necelistvosti se konzervativně předpokládají jako planární (eliptické trhliny s nejhorsí možnou orientací z hlediska hodnocení lomové mechaniky) nebo jako laminární (rovnoběžné se zkušebním povrchem).
- **Vyhodnocení.**  
Porovnání rozměrů necelistvostí s přípustnými velikostmi necelistvostí. Výsledkem může být i výměna dílu nebo oprava.

Řada norem a předpisů hodnotí jako nepřijatelné necelistvosti plošného (planárního) charakteru – trhliny, studené spoje a neprůvary – bez ohledu na jejich rozměry. V těchto případech pochopitelně odpadají fáze 4 a 5 a následuje rovnou nevyhovující hodnocení.

### 3. Rozměry necelistvostí

#### 3.1. Terminologie

Při zkoušení ultrazvukem se můžeme setkat se čtyřmi typy rozměrů; uvádíme pouze nejpoužívanější pojmy:

- **Náhradní, smluvní nebo ekvivalentní rozměry.**  
Rozměry indikace, určují se přes velikost (výšku) echa. Referenčním reflektorem je vývrt s plochým dnem kolmý na osu ultrazvukového svazku.
- **Maximální, pravděpodobné, konečné geometrické nebo reálné rozměry.**  
Rozměry necelistvostí určené s přesností použité zkušební techniky.
- **Schematizované rozměry.**  
Rozměry pro hodnocení a případné výpočty.
- **Skutečné rozměry.**  
U vnitřních necelistvostí se tyto rozměry nemusíme vůbec dozvědět.

Nejdůležitějším rozměrem necelistvostí je jejich výška (hloubka), tj. rozměr ve směru tloušťky stěny (TWE). Je smutnou ironií, že tento rozměr nelze některými metodami NDT vůbec určit a další zde dosahují obvykle nejslabší výsledky.

Podrobněji pojednává o problematice určování rozměrů při ultrazvukovém zkoušení TNR náš příspěvek z roku 2009 – viz [2].

#### 3.2. Potenciometrická metoda (měření úbytku napětí)

Relativně populární a rozšířená byla nejvíce v 80. a 90. letech minulého století potenciometrická metoda. Její hlavní využití spočívalo v měření hloubky povrchových trhlin v elektricky vodivých materiálech. Metoda byla jednoduchá, operativní a umožňovala velký rozsah měřených hloubek trhlin (max. 100÷120 mm). Ve své době dávala údajně nejpřesnější (objektivní) informace o hloubce povrchových trhlin, které byly obvykle detekovány kapilární metodou (PT) nebo metodou magnetickou práškovou (MT). Podrobnější údaje lze nalézt v dobové literatuře – např. [3]. Berte, prosím, tuto informaci jako nostalgickou vzpomínku autorů na již téměř zapomenuté zajímavé metody NDT.

#### 3.3. Defektometr

Polozapomenutá norma ČSN 05 1155:1982 [4], stále je ale platná, řeší měření rozměrů neprůvarů v kořeni svarových spojů při prozařování (RT) pomocí tzv. defektometrů – viz obr. 1. Jedná se vlastně o drážkové měrky různých velikostí (celkem 4) a z různých materiálů. Optimální situace nastala tehdy, když byla tloušťka defektometru stejná jako výška převýšení svaru a byl vyroben i ze stejného materiálu. Zajímavý, dnes prakticky nepoužívaný, pokus o měření rozměru ve směru tloušťky stěny při prozařování (RT).

### 4. Předpis NP-084-15

Prakticky k 60. výročí komerčního provozu JE v Rusku (včetně bývalého SSSR) byl vydán předpis NP-084-15 [5], který obsahuje kritéria pro hodnocení výsledků předprovozních a provozních kontrol. V současné době platí nejen v Ruské federaci, ale i v Arménii a naše společnost ŠJS jej letos úspěšně využila při opravě heterogenního svaru DN 1100 PG č. 43 v EBO. Obsahuje řadu dosud nepublikovaných kritérií pro hodnocení výsledků NDT, včetně základního materiálu, spojovacích dílů (svorníky, matice a podložky) i závitových hnízd, metody vířivých proudů pro teplosměnné trubky PG a ultrazvukového zkoušení austenitických a heterogenních svarů nejen pro provozní, ale také pro předprovozní či výrobní kontroly.

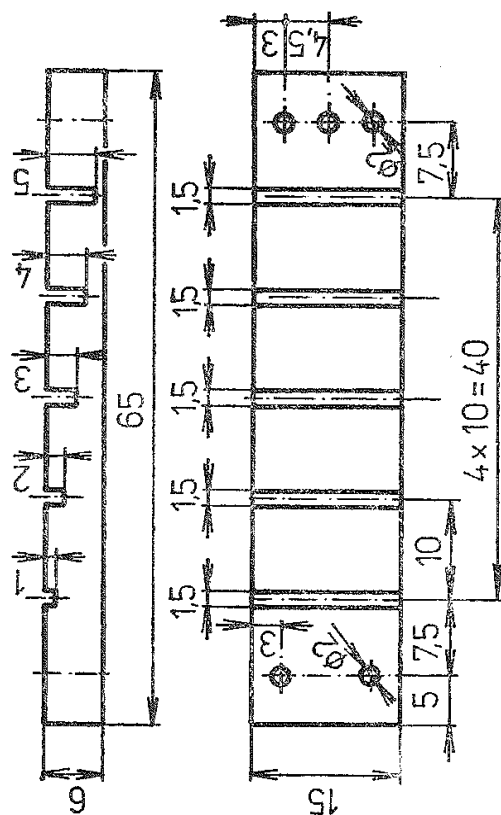
Závěr příspěvek obsahuje jako příklady kritéria přípustnosti při ultrazukovém zkoušení tupých austenitických a heterogenních svarů (tabulka 1) a při zkoušení obvodových heterogenních svarů kolektorů PG DN 1100 (tabulka 2).

## 5. Závěr

Předpis NP-084-15 obsahuje různé metodiky hodnocení výsledků zkoušení nedestruktivními metodami, včetně nutnosti určování reálných rozměrů necelistvostí. Příklady budou podrobně rozebrány při orální prezentaci na konferenci v Srní.

## Literatura

- [1] PK 1514-72 (1972): *Pravidla kontroly svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení*. Moskva: Metallurgia. (překlad z ruského jazyka)
- [2] Skála, Z., Stainer, L., Vít, J. (2009): *Určování pravděpodobných (skutečných) rozměrů necelistvostí detekovaných ultrazukem při automatizovaném zkoušení tlakových nádob reaktorů typu VVER*. Srní: 4. ročník konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.
- [3] Míšek, B., Ptáček, L. (1992): *Defektoskopie a provozní diagnostika*. Brno: VUT.
- [4] ČSN 05 1155 (1982): *Nedestruktivní zkoušení svarů – Určování hloubky kořenových vad ve svaru defektometrem*. Praha: ÚNM.
- [5] NP-084-15 (2015): *Pravidla pro kontrolu základního kovu, svarových spojů a navařených ploch při provozu zařízení, potrubí a dalších prvků jaderných elektráren*. Moskva: Rostechnadzor. (překlad z ruského jazyka)



Obr. 1: Defektometr podle ČSN 05 1155:1982

Tabulka 1: Hodnocení výsledků ultrazvukového zkoušení tupých austenitických a heterogenních svarů

Jmenovitá tloušťka svařených dílů [mm]	Průměr referenčního reflektoru ve tvaru bočního válcového vývrtu [mm] / Vzdálenost od zkušebního povrchu k referenčnímu reflektoru	Vyřazovací úroveň citlivosti vůči referenční úrovni [dB]		Přípustný počet registrovaných ojedinelých necelistvostí na libovolných 100 mm délky svarového spoje		Korekce N [mm]
		Provoz	Opravy	Provoz	Opravy	
Více než 5,5 až 10,0 včetně	2 / s/2	4	0	7	5	8
Více než 10,0 až 20,0 včetně	3 / s/2 a 2s/3	4	0	8	6	10
Více než 20,0 až 40,0 včetně	4 / s/4, s/2 a 3s/4	4	0	9	7	12
Více než 40,0	5 / s/5, 2s/5, 3s/5 a 4s/5	6	0	10	8	16

Poznámky:  
s – jmenovitá tloušťka svařených dílů.  
V tabulce uvedená vyřazovací úroveň citlivosti je stanovena pro kontrolu prováděnou pomocí standardního reflektoru ve formě bočního válcového vývrtu. Je dovoleno také provádět zkoušení s použitím jiných reflektorů za podmínky, že bude rovnocenná citlivost zkoušení.  
Kontrolní úroveň citlivosti (registrační úroveň) se dosahuje zvyšováním citlivosti zkoušení o 6 dB vzhledem k vyřazovací úrovni.  
Kontrolní úroveň citlivosti (registrační úroveň) musí být min. o 6 dB vyšší, než je průměrná úroveň šumů, v opačném případě se oblast zkoušení považuje za nevhodnou pro provádění ultrazvukového zkoušení a musí být zkontrolována jinou objemovou metodou.  
Smluvní délka zjištěných necelistvostí nesmí přesáhnout hodnotu  $\Delta L_0 + N$ , kde  $\Delta L_0$  je smluvní délka reflektoru s plochým dnem s průměrem, který se rovná průměru referenčního reflektoru, N – korekce v mm.  
Pro zajištění opakovatelnosti výsledků zkoušení musí být referenční vzorky (měrky) bez svarového spoje unifikovány a jejich provedení musí být schváleno hlavní organizací zabývající se materiály.  
Při ultrazvukovém zkoušení musí být zajištěno zkoušení min. 2/3 tloušťky svarového spoje přiléhajícího k jeho kořenové části.

Tabulka 2: Hodnocení výsledků ultrazvukového zkoušení heterogenních svarů PG DN 1100

Celková délka necelistvostí [mm]	Maximální výška necelistvostí pro případ, kdy doba do příští kontroly či opravy je [mm]			
	Max. 12 měsíců	Max. 24 měsíce	Max. 36 měsíců	Max. 48 měsíců
Do 462 včetně	19,0	17,0	15,0	13,0
Větší než 463 až do celoobvodové	16,0	14,0	12,0	10,0



# HODNOCENÍ POŠKOZENÍ CHLADÍCÍCH KROUŽKŮ DIESELGENERÁTORU 6ZL40/48 NA JE DUKOVANY

## DAMAGE ASSESMENT OF THE COOLING INSERTS OF DIESELGENERATOR 6ZL40/48 AT NPP DUKOVANY

Miroslava Ernestová<sup>a)</sup>, Miroslav Krpec<sup>a)</sup>, Petr Brabec<sup>a)</sup>, Dana Tonarová<sup>a)</sup> a Zdeněk Čančura<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

<sup>b)</sup> ČEZ a. s., JE Dukovany

### Abstrakt

Opakovaná poškození chladících kroužků koruny pístu DG (v 2013 a 2017) vyvolala program na hodnocení mikrostruktury, mechanických vlastností a ověření chemického složení materiálu poškozených i nepoškozených chladících kroužků za účelem stanovení příčiny poškození a doporučení pro provoz.

### Abstract

Repeated damages of cooling inserts at DG piston crown in 2013 and 2017 lead to experimental program in UJV. Microstructure evaluation, mechanical properties measurement and chemical analysis were carried out on damaged and undamaged cooling inserts as well for to assess the root damage and to give recommendation for operation.

### Úvod

Dieselgenerátory (DG) slouží na JE jako zálohy pro případ, že by elektrárna přišla o veškeré způsoby napájení. Nejsou tedy trvale v provozu, jejich připravenost k zálohování je pravidelně ověřována. DG typu 6ZL40/48 je řadový šestiválec s přeplňováním vzduchem o přetlaku 0,05 – 0,22 MPa.

Předmětem destruktivních UJV analýz byly 30 let provozované chladící kroužky havarované v roce 2013 (2QX/6) a 2017 (2QX/5), dále 30 let provozované nehavarované kroužky (2QX/3, 1QX/6) a jeden kus neprovozovaného kroužku pro srovnání (ND), tabulka 1 [1]. V ÚJV byly prováděny i nedestruktivní analýzy na dalších neprovozovaných chladících kroužcích za účelem stanovení typu použité litiny pomocí replik [1, 2].

### Vzhled a funkce chladícího kroužku DG

Litinový chladící kroužek je součástí DG, šrouby M12 je přichycen ke koruně pístu a dalšími šrouby k horní kulové polovině pánve ustavené v plášti pístu (tabulka 1). Radiální otvory v kroužku umožňují odvod teplého oleje a chlazení komponenty. Vzhled kroužků je na obr. 1.

### Destruktivní analýzy a použité metody hodnocení

Po základní vizuální prohlídce a fotodokumentaci byly kroužky podrobeny destruktivním analýzám za účelem ověření chemického složení jejich materiálů metodou optické emisní spektrometrie (OES), hodnocení mikrostruktury na metalografických výbrusech a stanovení mechanických vlastností. U chladícího kroužku havarovaného v roce 2017 byla provedena detailní vizuální kontrola doplněná o fraktografické hodnocení lomových ploch za účelem stanovení mechanismu poškození. Pro fraktografické hodnocení lomových ploch byl použit rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130 XM od firmy TESCAN.

## Stanovení chemického složení

Složení materiálů bylo stanoveno metodou optické emisní spektrometrie. Upřesnění obsahu C a S bylo provedeno spalovací spektrometrickou metodou. Obsah naměřených hodnot chemických prvků je uveden v tabulce 2. Kroužky odpovídají svým chemickým složením materiálu litin s obsahem uhlíku v rozmezí 3,37 – 3,7 %.

## Hodnocení mikrostruktury

Mikrostruktura litin byla hodnocena na metalografických výbrusech, obr. 2. Struktura poškozených kroužků 2QX/5 a 2QX/6 obsahuje grafit ve tvaru lupínků. Jedná se o litinu s lupínkovým grafitem (LLG). Mikrostruktura obou kroužků je převážně perlitická (85 – 92 %), místy byl patrný ferit (8 – 15 %). Kroužky se liší v obsahu grafitu (15,4 % u 2QX/5; 20,4 % u 2QX/6).

Struktura nepoškozeného kroužku 2QX/3 a struktura nového kroužku ND obsahuje převážně grafit ve tvaru červíků s menším zastoupením grafitu ve tvaru kuliček, v obou případech se jedná o vermikulární litinu s červíkovitým grafitem (LVG). Kroužek 2QX/3 obsahuje dokonale a nedokonale zrnitý grafit, kroužek ND obsahuje více nedokonale zrnitého než dokonale zrnitého grafitu. V naleptaném stavu (2QX/3) je patrna feriticko-perlitická struktura (80/20 %) s místy se vyskytujícími lamelárním perlitem a s velmi ojedinělou přítomností globulárního perlitu, popř. feritická struktura s množstvím perlitu pouze 2 % (ND).

Struktura chladicího kroužku 1QX/6 obsahuje kuličkový grafit (tvárná litina s kuličkovým grafitem, LKG). Ve struktuře převažuje nedokonale zrnitý grafit. Mikrostruktura je feriticko-perlitická s obsahem perlitu 20 – 30 %. Místy je patrný tzv. Chunky grafit (rozpadnutý grafit).

## Mechanické vlastnosti

Tahové zkoušky za pokojové teploty byly provedeny na zkušebních tělesech (ZT) o  $\varnothing$  4 mm, vyrobených z vyříznuté části každého kroužku ve směru osy kroužku. Mechanické zkoušky jednoznačně potvrdily nízkou mez pevnosti pro oba havarované chladicí kroužky 2QX/5 a 2QX/6 z LLG (< 100 MPa), střední mez pevnosti pro chladicí kroužky 2QX/3 a nový kus ND z LVG (250 – 350 MPa) a zvýšenou mez pevnosti pro chladicí kroužek 1QX/6 z LKG (480 MPa). Souhrn naměřených mechanických vlastností je v tabulce 3.

Chladicí kroužek je ke koruně pístu přichycen šrouby M12 (tabulka 1). Ze 2 nových a 2 provozovaných šroubů bylo vyrobeno po dvou ZT, z nejméně poškozeného šroubu chladicí vložky 2QX/5 havarované v 2017 bylo vyrobeno jedno ZT (tabulka 4). Mechanické zkoušky jednoznačně potvrdily vysokou mez pevnosti pro oba šrouby (provozovaný x neprovozovaný), (> 900 MPa). Mez pevnosti u šroubu z poškozené chladicí vložky 2QX/5 havarované v 2017 byla o cca 170 MPa nižší. Souhrn naměřených mechanických vlastností je v tabulce 4.

## Fraktografické hodnocení lomových ploch

Fraktografické hodnocení bylo provedeno na lomových plochách poškozeného kroužku 2QX/5 a na poškozeném šroubu M12. Lomové plochy kroužku kolmé na osu kroužku a procházející otvory pro odvod teplého oleje byly mechanicky zhmožděné. Morfologie lomu obsahovala znaky transkrystalického štěpného porušení s občasným výskytem interkrystalického lomu, byla patrna štěpnost zrn lupínkového grafitu. Z lomové plochy šroubu je patrné, že k poškození šroubů došlo pravděpodobně torzí (krutem). V detailu je viditelné tvárné poškození charakteristické přítomností důlků, ukazující na poškození šroubů náhlým přetížením. Ani v jednom případě nebyly nalezeny znaky únavového poškození.

## Závěr

Metalografické hodnocení, provedené destruktivní metodou na chladících kroužcích DG, ukázalo použití nevyhovující litiny s lupínkovým grafitem u obou havarovaných kroužků. Mechanické zkoušky potvrdily nízkou mez pevnosti v tahu u této litiny. Další chladící kroužky byly vyrobeny z vermikulární litiny s červíkovitým grafitem a z tvárné litiny s kuličkovým grafitem, obě tyto litiny vykazují výrazně vyšší mez pevnosti.

Pro ověření mikrostruktury materiálu chladících vložek bez nutnosti destruktivního zásahu byl v ÚJV stanoven pracovní postup odběru tzv. metalografických replik. Tato metoda umožňuje bez porušení integrity chladící vložky stanovit, jedná-li se o litinu s lupínkovým grafitem jako u havarovaných vložek.

## Literatura

- [1] Krpec, M., Ernestová, M., Brabec, P., Tonarová, D. (2018): *Hodnocení mikrostruktury, mechanických vlastností a chemického složení chladících vložek z DG 6ZL40/48 EDU*, zpráva ÚJV DITI 2302/547.
- [2] Brabec, P., Tonarová, D. (2018): *Využití metalografických replik při nedestruktivní identifikaci materiálu chladících kroužků pro dieselgenerátory JĚ Dukovany*. Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, str. 167-170.

Tabulka 1: Seznam chladících kroužků pro destruktivní analýzy, vzhled koruny a kroužku

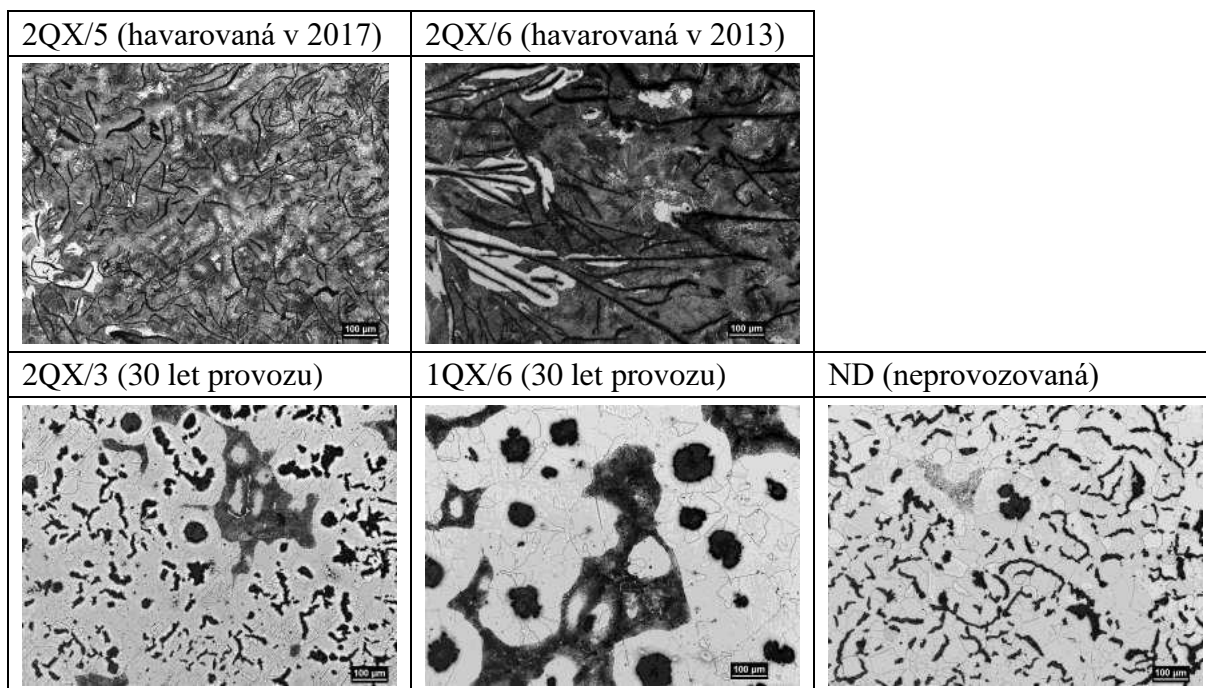
Kroužek č.	Počet let v provozu
2QX/3	30
2QX/5	30 – havarovaný (2017)
2QX/6	30 – havarovaný (2013)
1QX/6	30
ND	bez použití



Obr. 1: Vzhled chladícího kroužku (a, b – nepoškozeného, c – poškozeného)

Tabulka 2: Chemické složení materiálu chladících kroužků (OES)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Mg	Ti	V
2QX/3	3,60	1,83	0,124	0,023	0,018	0,048	0,003	0,020	0,015	0,034	0,014	0,015	0,014
2QX/5	3,70	1,65	0,173	0,052	0,047	0,065	0,003	0,016	0,007	0,043	0,005	0,017	0,016
2QX/6	3,71	1,70	0,127	0,027	0,037	0,043	0,003	0,014	0,008	0,045	0,006	0,010	0,013
1QX/6	3,37	2,48	0,199	0,023	0,004	0,067	0,003	0,035	0,016	0,045	0,018	0,035	0,017
ND	3,78	1,90	0,083	0,010	0,010	0,031	0,003	0,015	0,015	0,013	0,007	0,005	0,011




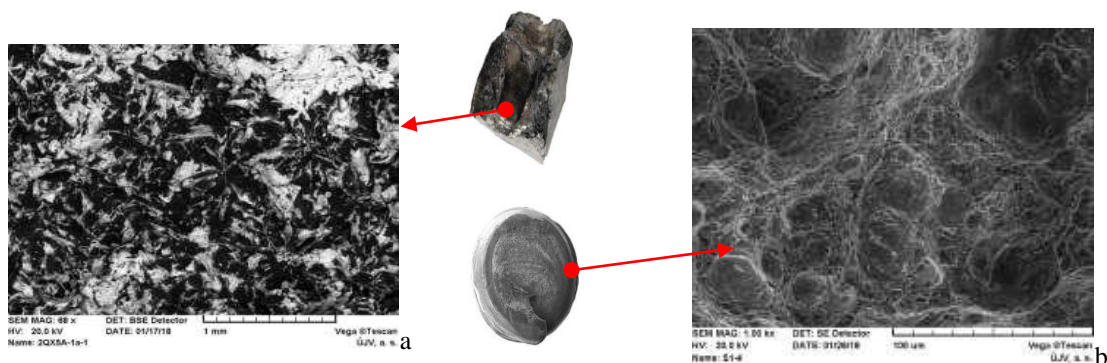
Obr. 2: Mikrostruktura chladících kroužků

Tabulka 3: Mechanické zkoušky – chladící kroužky

Kroužek č.	Počet let v provozu	Litina	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
2QX/3	30	LVG	326	260	4
2QX/5	30 – havarovaný (2017)	LLG	89	-	<1
2QX/6	30 – havarovaný (2013)	LLG	98	-	<1
1QX/6	30	LKG	481	350	16
ND	bez použití	LVG	247	200	5

Tabulka 4: Mechanické zkoušky – šrouby

Šroub M12	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	
nový	963	880	15	
provozovaný	957	810	16	
provozovaný – z chladícího kroužku 2QX/5 havarovaného v 2017 (30 let provozu)	782	585	20	



Obr. 3: Lomová plocha havarovaného kroužku 2QX/5 (a), lomová plocha šroubů M12 (b)

# KOMPLEXNÍ VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ KLUZNÝCH LOŽISEK S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY

## ADVANCED COMPUTATIONAL MODELLING OF TILTING PAD JOURNAL BEARINGS

Luboš Smolík<sup>a)</sup>, Václav Houdek<sup>b)</sup> a Jan Hyrátek<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

<sup>b)</sup> Západočeská univerzita v Plzni

### Abstrakt

Kluzná ložiska s naklápěcími segmenty se používají k ukládání točivých strojů s vysokou obvodovou rychlostí čepů hřídele. Ve výpočtech rotorové dynamiky se často zanedbává kmitání naklápěcích segmentů a síly přenášené ložiskem se linearizují. V příspěvku je představen výpočtový model respektující nelineární charakter sil v mazacím filmu, uložení segmentů a poddajnost segmentů i ložiskového tělesa. Model je schopen predikovat kmitání segmentů, kavitaci v mazivu a opotřebením kluzných ploch.

### Abstract

Tilting pad bearings can be found in rotating machinery with high circumferential speeds of journals. Vibrations of individual pads are usually neglected in rotordynamics simulations and hydrodynamic forces acting in oil films are often linearized. A computational model which respects non-linear properties of hydrodynamic forces, contact forces between the pads and a bearing housing, and deformations of the pads and the housing is introduced in this paper. The model can be used for the analysis of vibrational and tribological parameters including wear of bearing surfaces.

### Úvod

Kluzná ložiska s naklápěcími segmenty (KLNS) nacházejí uplatnění v aplikacích, kde je očekávána vysoká obvodová rychlost čepu hřídele, protože jsou méně náchylná k nestabilnímu chování než ložiska s pevnou geometrií [1].

Ve výpočtech rotorové dynamiky se KLNS obvykle modelují stejně jako kluzná ložiska s pevnou geometrií. V případě těchto ložisek se vychází se ze skutečnosti, že čep hřídele rotující danými otáčkami je nadzvedáván hydrodynamickou (HD) silou a zaujme rovnovážnou polohu v tzv. pracovním bodě. Poloha pracovního bodu závisí na typu a rozměrech ložiska, otáčkách, zatížení od rotoru a viskozitě maziva [2]. Pokud se čep pohybuje v blízkosti pracovního bodu, je HD síla, která na něj působí, téměř přímo úměrná výchylkám a rychlostem čepu a lze jí vyjádřit vztahem

$$\begin{bmatrix} F_{hd,x} \\ F_{hd,y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} b_{xx} & b_{xy} \\ b_{yx} & b_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ \Delta\dot{y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde  $F_{hd,x}$  a  $F_{hd,y}$  jsou horizontální a vertikální složka hydrodynamické síly,  $\Delta x$  a  $\Delta y$  jsou horizontální a vertikální výchylky čepu hřídele měřené od pracovního bodu,  $\Delta\dot{x}$  a  $\Delta\dot{y}$  jsou příslušné rychlosti čepu a  $b_{ij}$  a  $k_{ij}$  jsou koeficienty tlumení a tuhosti ložiska [1, 2]. Koeficienty tlumení a tuhosti se stanovují pro dané zatížení ložiska, dané parametry mazacího oleje a jsou navíc závislé na otáčkách [3]. Pro každé ložisko točivé stroje a pro každé otáčky se tedy koeficienty stanovují zvlášť. Koeficienty v sobě mohou zahrnovat vliv deformací segmentů a tuhost jejich podpor. Model (1) je vhodný pro výpočty dynamiky rotoru při konstantních provozních parametrech. Nehodí se pro analýzu přechodových stavů a neumožňuje simulovat lokální děje, např. tlak v olejovém filmu či kmitání segmentů.

## Komplexní model kluzného ložiska s naklápěcími segmenty

Na rozdíl od linearizovaného modelu (1) se komplexní model ložiska skládá z jednotlivých těles a vazeb mezi nimi. Zjednodušené schéma komplexního modelu je ukázáno na obr. 2b.

Mezi čepem hřídele a segmentem se nachází olejový film, ve kterém se generuje hydrodynamický tlak, který závisí na otáčkách čepu a vzájemné poloze čepu a segmentu. Účinky hydrodynamického tlaku na čep hřídele a segment jsou modelovány pomocí několika desítek sil (1 z obr. 2b), jejichž nositelky jsou rovnoměrně rozmístěny na ploše segmentu. Při každém pohybu segmentu či čepu se je nutné pole hydrodynamického tlaku přepočítat.

Segmenty se opírají v opěrném bodě o ložiskové těleso. Konstruktivní řešení opěrného bodu je různé – u málo zatížených ložisek může jít o radiální podporu přišroubovanou k ložiskovému tělesu, která je zakončena hrotem či kulovou plochou [1]. V případě více zatížených ložisek segment buď volně leží na ložiskovém tělese, nebo se opírá o kulový prvek, který je umístěn do drážky v ložiskovém tělese (angl. *ball and socket*) [4]. V místě dotyku segmentu a opěrného prvku vznikají elastické kontaktní síly (2 z obr. 2b). Tyto síly jsou nelineární a závisí na míře deformace těles, která jsou v kontaktu.

Naklápění segmentu je limitováno konstrukčním řešením celého ložiska. Segment se může v určitém malém intervalu naklápět volně. V krajních bodech tohoto intervalu je pohyb segmentu vymezen hradítky nebo ložiskovým tělesem. V modelu je tato vazba (3 z obr. 2b) uvažována tak, že v určitém intervalu nepůsobí na segment prakticky žádnou silou a jakmile naklopení segmentu překročí nastavenou mez, začne na segment působit elastická síla.

Konkrétní vlastnosti vazeb (2) a (3) je nutné naladit podle vlastností modelovaného ložiska. Z hlediska výpočtového času je nejvýhodnější tuhost a tlumicí účinky kontaktních vazeb zadat pomocí nelineární.

### Ukázka výsledků

Možnosti výše popsaného komplexního modelu jsou demonstrovány na příkladu kluzného ložiska se třemi naklápěcími segmenty v konfiguraci „zatížení na segment“. Základní parametry zkoumaného ložiska jsou uvedeny v tabulce 1. Úloha byla uvažována jako rovinná, tj. naklápění těles kolem příčných os bylo zanedbáno. Všechna tělesa byla uvažována jako tuhá.

Simulováno bylo ustálené kmitání čepu hřídele a všech tří segmentů při různých otáčkách z intervalu 1500 – 7000 ot/min. Úhel natočení segmentů byl omezen na  $\pm 4^\circ$  a kontakt mezi segmentem a ložiskovým tělesem byl pro jednoduchost považován za lineární.

Na obr. 2 je zobrazen tlakový obrazec, který se vytváří v olejovém filmu na dolním (zatíženém) segmentu. Tvar obrazce se s rostoucími otáčkami příliš nemění, klesá ale maximální hydrodynamický tlak.

Jednotlivé segmenty mírně kmitají, dominantní frekvence natáčení je totožná s otáčkami čepu hřídele. Amplitudy kmitání, zobrazené na obr. 3, jsou závislé na nevyváženosti rotoru.

Statická rovnovážná poloha čepu hřídele v prostoru ložiskových vůlí závisí na otáčkách a obdobně jako u jiných typů ložisek se čep přibližuje geometrickému středu ložiska s rostoucími otáčkami, viz obr. 4.

Pomocí komplexního modelu byly rovněž identifikovány koeficienty tuhosti a tlumení. Výsledky se poměrně dobře shodovaly s analýzou pomocí softwaru ARMD TILTBR V5.7.

### Závěr

V příspěvku byl stručně popsán komplexní model kluzného ložiska s naklápěcími segmenty, který umožňuje simulace přechodových a lokálních jevů. Model zahrnuje kromě čepu hřídele také segmenty a ložiskové těleso. Veškerá tělesa mohou být deformovatelná a jsou spojena nelineárními silovými vazbami – elastickými kontaktními silami a třecími silami v místě kontaktu těles a hydrodynamickými silami v olejových filmech.



## Poděkování

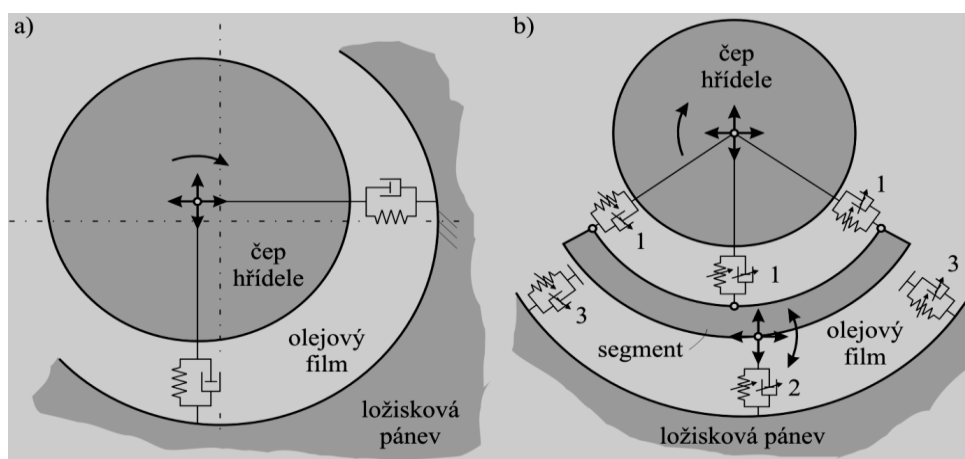
Tato publikace byla podpořena projektem TE01020068 Technologické agentury ČR a projektem SGS-2016-038 Západočeské univerzity v Plzni.

## Literatura

- [1] Lund, J.W. (1964): Spring and damping coefficients for the tilting-pad journal bearing. *ASLE Transactions*, Vol. 7, No. 3, pp. 342-352.
- [2] Gasch, R., Pfützner, H. (1980): *Dynamika rotorů*. Praha: SNTL.
- [3] Delgado, A., Vannini, G., Ertas, B., Drexel, M., Naldi, L. (2011): Identification and prediction of force coefficients in a five-pad and four-pad tilting pad bearing for load-on-pad and load-between-pad configurations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 133, pp. 092503-1–092503-9.
- [4] Kim, S.-G., Kim, K.-W. (2008): Influence of pad–pivot friction on tilting pad journal bearing. *Tribology International*, Vol. 41, No. 8, pp. 694-703.

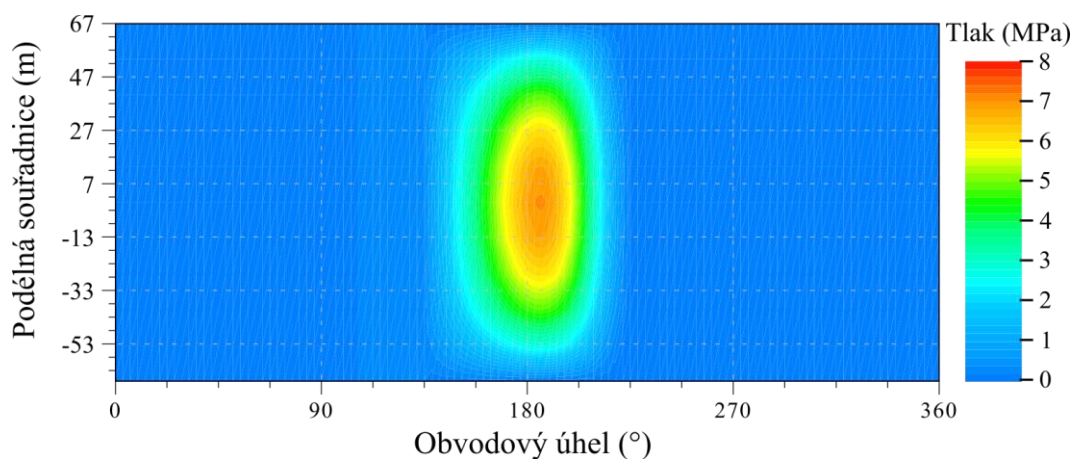
Tabulka 1: Parametry simulovaného ložiska

Parametr	Hodnota	Jednotka	Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr čepu	220,00	(mm)	Minimální otáčky	1500	(ot/min)
Délka ložiska	134,00	(mm)	Maximální otáčky	7000	(ot/min)
Počet segmentů	3		Typ oleje	ISO VG 46	
Konfigurace	zatížení na segment		Viskozita oleje	0,02	(Pa s)
Radiální vůle spodního segmentu	257,50	( $\mu\text{m}$ )	Průtoková rychlost	78,80	(l/min)
Radiální vůle horních segmentů	340,00	( $\mu\text{m}$ )	Mazací tlak	2,00	(bar)
Předpětí	0,00	(–)	Tlak okolí	1,00	(bar)
Úhlová délka segmentu	90,00	( $^{\circ}$ )	Kavitační tlak	0,98	(bar)
Tloušťka segmentu	28,00	(mm)	Radiální zatížení	24,57	(kN)
Úhlová poloha opěrného bodu	45,00	( $^{\circ}$ )	Směr zatížení	270,00	( $^{\circ}$ )
Radiální poloha opěrného bodu	138,00	(mm)	Měrné zatížení	1,44	(MPa)

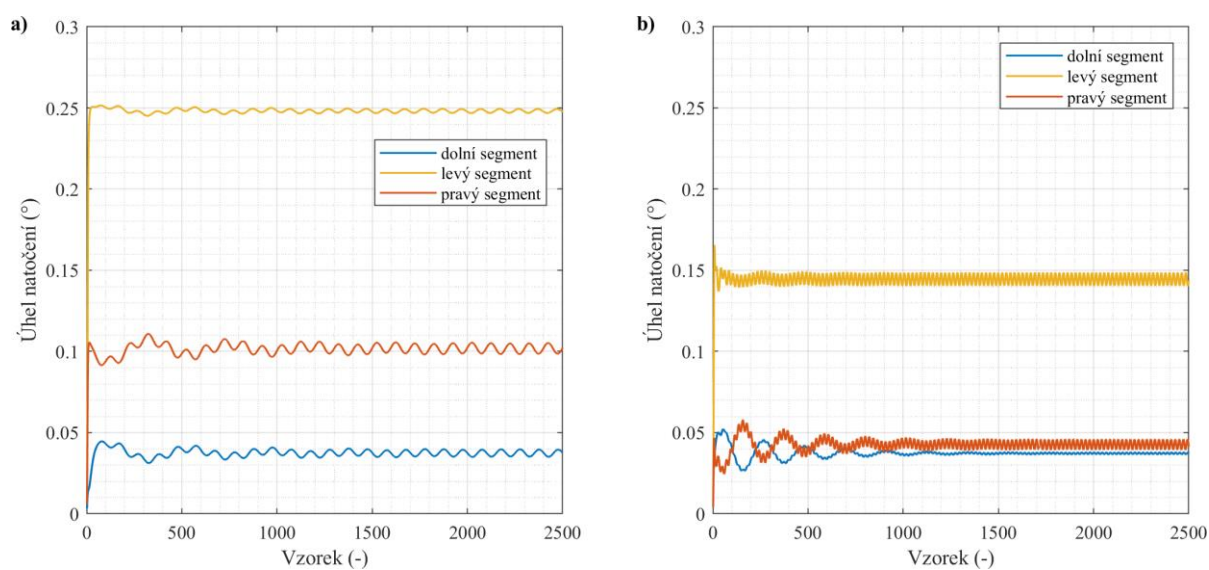


Obr. 1: a) Schéma linearizovaného modelu kluzného ložiska (převzato z [2]); b) schéma nelineárního modelu kluzného ložiska s jedním naklápěcím segmentem

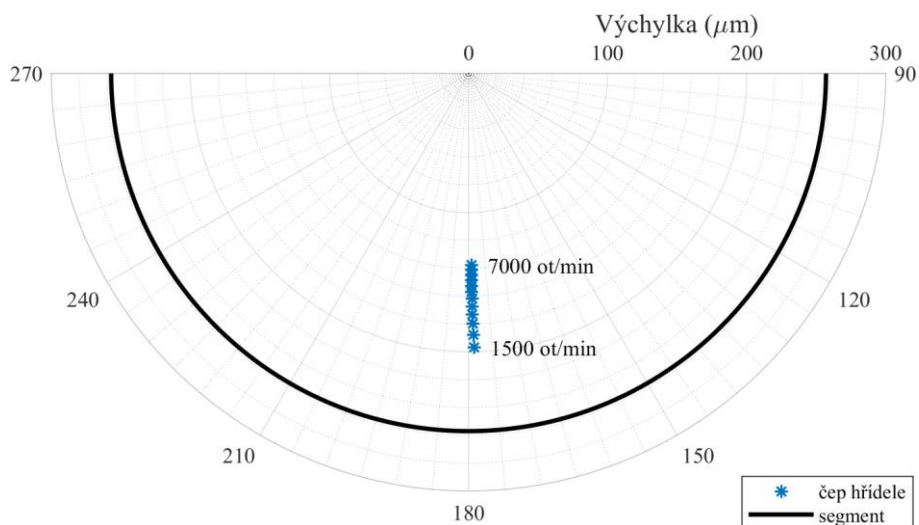




Obr. 2: Typický tlakový obrazec, který se vytváří v olejovém filmu na dolním segmentu



Obr. 3: a) Relativní natočení segmentů simulovaného ložiska při rychlosti 1500 ot/min; b) relativní natočení segmentů simulovaného ložiska při rychlosti 7000 ot/min



Obr. 4: Závislost stacionární polohy čepu hřídele na otáčkách

# DIAGNOSTIKA TORZNÍCH VIBRACÍ ROTORU TURBOGENERÁTORU

## DIAGNOSTICS OF TURBOGENERATOR ROTOR TORSIONAL VIBRATION

Jindřich Liška, Sven Künkel a Jan Jakl

Západočeská univerzita v Plzni, NTIS – výzkumné centrum

### Abstrakt

Online vyhodnocení a predikce poruch turbogenerátoru jsou klíčovým faktorem jeho úspěšného dlouhodobého provozu. Kolísání točivého momentu generátoru, způsobené například nestacionárními podmínkami v elektrické rozvodné síti, ovlivňuje torzní vibrace hřídele, stejně jako vibrace např. oběžných lopatek. Příznaky torzních vibrací hřídele nejsou měřitelné běžně používanými čidly vibrací osazenými na turbíně, takže je třeba použít speciální měření. Analýza a vyhodnocení torzních kmitů hřídele pomocí metody analýzy okamžité úhlové rychlosti jsou v příspěvku prezentovány dvěma případovými studiemi.

### Abstract

Online evaluation and prediction of turbine generator failures is a key factor for its successful long-term operation. Generator torque fluctuations, caused by, for example, non-stationary conditions in the power grid, affect the shaft torsional vibration as well as the vibration of the rotating blades. Symptoms of torsional shaft vibration are not measurable by commonly used vibration sensors mounted on the turbine, so special measurements are needed. The analysis and evaluation of shaft torsional vibration using the instantaneous angular velocity analysis method are presented in the paper by two case studies.

### Úvod

Torzní vibrace turbogenerátoru se projevují jako oscilační relativní úhlový posun jednotlivých částí rotoru. Kvůli torzní deformaci dochází ke změnám napětí v materiálu, které v nejnepríznivějším scénáři mohou způsobit prasknutí hřídele. Nejdůležitějším zdrojem torzního buzení jsou rychlé změny momentu vzduchové mezery generátoru, které doprovází většinu přechodových dějů v elektrické síti. Synchronizace, resp. fázování generátoru k elektrizační soustavě, je také důležitým zdrojem torzního buzení. Z diagnostického hlediska je monitorování torzních vibrací obtížné, protože se nešíří z rotoru na statorovou část stroje a nemůže být měřeno pomocí standardních přístrojů pro měření relativních kmitů hřídele nebo měření absolutních vibrací statorových částí. Další nepříznivá charakteristika torzních vibrací, vyplývající z torzní vazby rotoru a statoru, spočívá v tom, že torzní vibrace mají velmi nízké relativní tlumení. Tím může být dosaženo vysokých amplitud vibrací v případě rezonance nebo opakovaného buzení.

Předchozí výzkum diagnostiky torzních vibrací pokrývá celou řadu technik snímání i zpracování dat. Dobrý přehled o časných průkopnických metodách lze nalézt v [1]. V publikacích z nedávné doby lze pozorovat vývoj dvou trendů měření torzních vibrací. První z nich využívá akcelerometry nebo tenzometry přímo připojené k hřídeli [2, 3]. V tomto případě lze přímo měřit úhlové zrychlení nebo torzní deformace, avšak zvláštní pozornost je třeba věnovat odolnosti snímače vůči odstředivým silám, jeho napájení a datové komunikaci. Druhá skupina používá pasivní enkodér připojený k obvodu hřídele společně se statickým senzorem umožňujícím měření okamžité úhlové rychlosti [4, 5]. Tyto techniky jsou snadněji instalovatelné, ale vyžadují náročnější následné zpracování dat se zahrnutím kompenzace chyby měření.

V tomto příspěvku je prezentována nová metoda pro hodnocení torzních vibrací založená na přesném výpočtu okamžité úhlové rychlosti pomocí enkodéru reflexní pásky a optické sondy. Hlavní rysy této metody jsou její schopnost kompenzovat nepravidelnosti geometrie enkodéru

nebo chybějící segmenty pásy. Následně převádí navržená interpolace úhlovou reprezentaci na časovou, díky níž mohou být jednotlivé frekvenční složky lépe identifikovatelné z Fourierova spektra.

### Vyhodnocení torzních vibrací rotoru z měřených dat

V tomto příspěvku jsou ukázány výsledky dvou měření, kdy při obou měřeních byla jako enkodér na rotoru použita reflexní páska s šířkou odrazivých pruhů 5 mm. Optický vlnovod uchycený k ocelové konzoli byl magneticky připevněn ke statorové části stroje. Situace je zobrazena na obr. 1.

První diskutovaný případ torzního měření pochází z měření na hřídeli turbogenerátoru (TG) o výkonu 250 MW. Měřicí rovina byla umístěna na dostupném úseku hřídele mezi generátorem a nízkotlakým dílem TG. Reflexní páska po obvodu hřídele obsahovala celkem 137 pruhů (míst s vyšší odrazivostí). Shodou okolností byl během období měření zachycen významný přechodový jev, který byl způsoben výpadkem blízkého bloku. Obr. 2 ukazuje okamžitou úhlovou rychlost v čase zahrnujícím zmíněnou událost. Z časového signálu je na první pohled pozorovatelná pouze nízkofrekvenční složka odezvy hřídele. Lepší pochopení obsahu frekvence signálu však poskytuje spektrogram uvedený na obr. 3. Zde je patrné zřetelné vybuzení 4 různých frekvenčních komponent v době události. Komponenty s frekvencí 17 Hz a 28 Hz jsou první dvě torzní vlastní frekvence rotoru. Další dvě blízké komponenty na frekvencích 96 Hz a 98 Hz jsou vlastní frekvence lopatek posledních olopatkovaných kol nízkotlakého dílu.

Díky časo-frekvenční reprezentaci poskytované spektrogramem je možné zřetelně pozorovat náhlé vybuzení vlastních frekvencí a relativně nízký útlum jejich amplitudy. Dvojice přerušovaných svislých čar vymezuje časový rozsah použitý na obr. 2. Maximální hodnota první přirozené torzní složky při 17 Hz v době vybuzení, získané ze spektrogramu je 4,75 ‰/s. Tuto hodnotu lze převést na rad/s a pomocí rovnice (1) lze vypočítat špičkovou hodnotu příslušného relativního obvodového kmitu

$$A_C = 4,75 \cdot \frac{\pi}{180} \frac{1370/2/\pi}{2\pi f} = 0,169 \text{ [mm]}. \quad (1)$$

Číselník 1370/2/π reprezentuje poloměr hřídele (obvod je 1370 mm). Druhé měření se uskutečnilo na rozdílném TG o stejném výkonu 250 MW. Rovina měření byla opět umístěna na dostupném úseku hřídele mezi generátorem a nízkotlakým dílem turbíny. Reflexní páska byla tvořena z celkem 140 pruhů. Během nepřetržitého období tříměsíčního sledování torzních vibrací byly zaznamenány četné torzní události vyvolané přechodovými ději v elektrické síti. Obr. 4 zobrazuje spektrogram okamžité úhlové rychlosti během jednoho ze zaznamenaných přechodových dějů. Opět je vidět vybuzení prvních dvou hřídelových torzních vlastních frekvencí, v tomto případě 20 Hz a 39 Hz a jejich nízký útlum. Nicméně, v porovnání s předchozím případem nelze ve spektrogramu nalézt žádné vibrace lopatek. Důvodem tohoto rozdílu je zřejmě to, že v prvním případě se jednalo o volné nízkotlaké lopatky turbíny, zatímco v druhém případě byly lopatky vázané. Vazba mezi lopatkami způsobuje, že lopatky jsou tužší, a proto se neobjevuje žádné znatelné torzně vyvolané vybuzení těchto lopatek ve srovnatelných amplitudových úrovních. Tento výsledek vyplývá nejen z této jediné události, ale vyhovuje všem 89 torzním událostem detekovaným během 3 měsíční měřicí kampaně.

Maximální hodnota amplitudy na složce 20 Hz v době vybuzení získaná ze spektrogramu je 9,02 ‰/s což odpovídá hodnotě amplitudu torzního kmitu hřídele 0,326 mm.

## Závěr

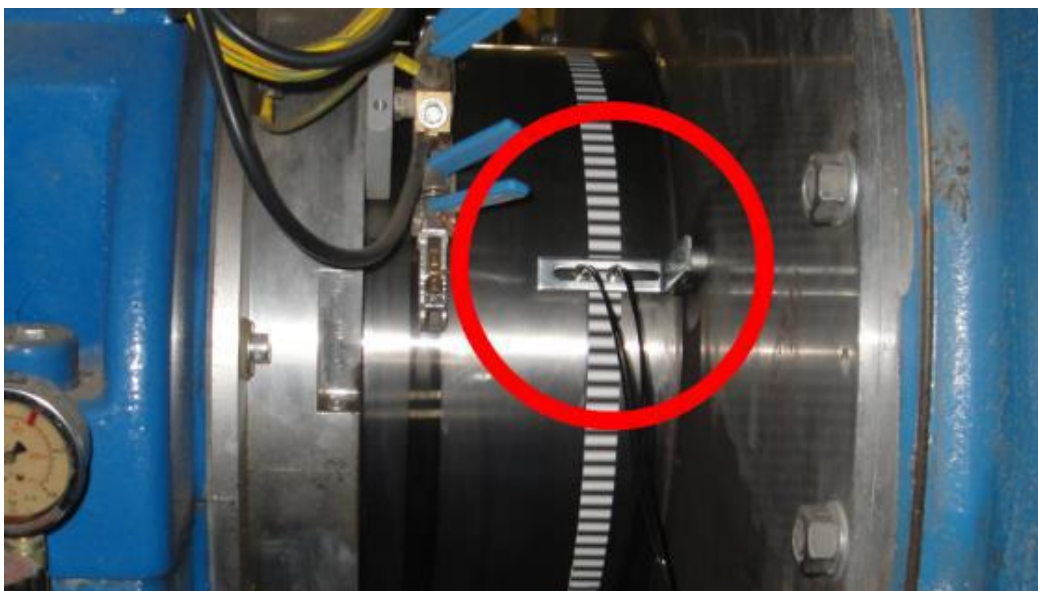
V tomto příspěvku byly ukázány výsledky analýzy torzního kmitání z dat naměřených v provozu dvou různých TG o výkonu 250 MW. Byla pozorována přítomnost rotorových torzních vlastních frekvencí, které byly významně vybudeny účinkem přechodového děje v elektrické síti. Současně byla potvrzena schopnost instalovaného měřicího řetězce detekovat a monitorovat výskyt frekvencí spojených s kmitáním oběžných lopatek posledních kol nízkotlakých dílů turbín. Tento fakt umožňuje využít popsanou metodu k dlouhodobému monitorování torzního chvění rotorů turbín s cílem odhalit nebezpečné stavy torzních kmitů z pohledu buzení vibrací oběžných lopatek případně buzení komponent generátoru (např. chvění čel vinutí).

## Poděkování

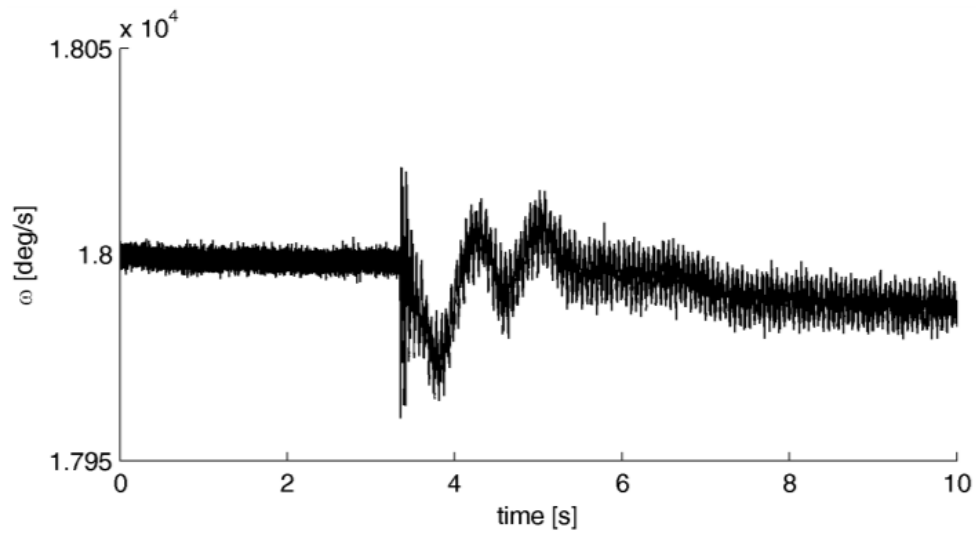
Tato práce vznikla díky finanční podpoře z projektu PUNTIS-LO1506 – Podpora udržitelnosti centra NTIS – Nové technologie pro informační společnost z dotačních prostředků Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky.

## Literatura:

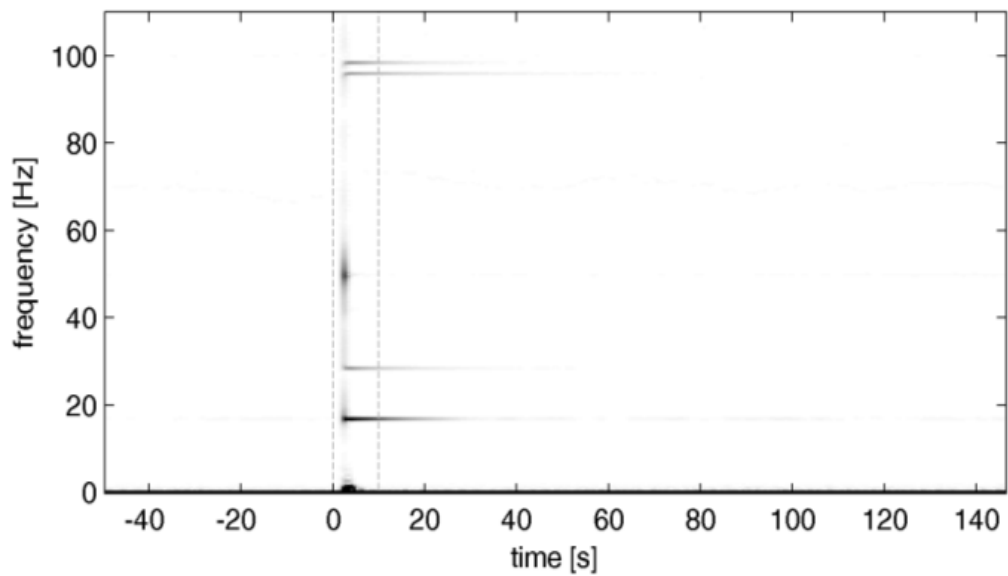
- [1] Walker, D. N., Adams, S. L., Placek, R. J. (1981): *Torsional vibration and fatigue of turbine-generator shafts*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, pp. 4373-4380.
- [2] Huster, J., Eckert, L., Pohle, F. (1998): *Calculation and measurement of torsionals in large steam turbosets*. ABB review 6/1998, pp. 1-10.
- [3] Walker, D. (2003): *Torsional vibration of Turbomachinery*. New York: McGraw-Hill Professional, pp. 125-130.
- [4] Resor, B. R., Trethewey, M. W., Maynard, K. P. (2005): *Compensation for encoder geometry and shaft speed variation in time interval torsional vibration measurement*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 286, pp. 897-920.
- [5] Diamond, D. H., Heyns, P. S., Oberholster, A. J. (2016): *Online shaft encoder geometry compensation for arbitrary shaft speed profiles using Bayesian regression*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 81, pp. 402-418.



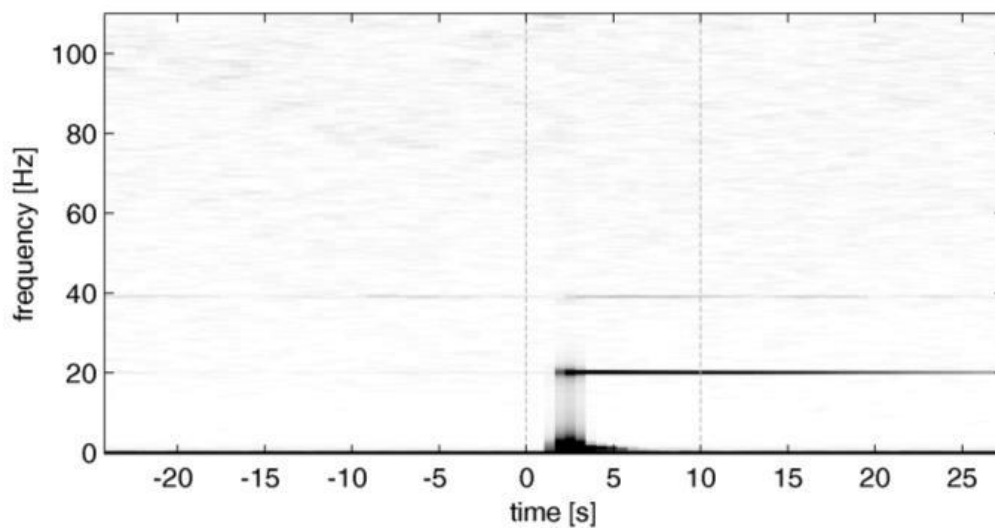
Obr. 1: Instalace reflexní pásky na rotoru a uchycení optických vlnovodů



Obr. 2: Okamžitá úhlová rychlost během přechodového děje v síti (TG 250MW), A



Obr. 3: Spektrogram signálu okamžité úhlové rychlosti, A



Obr. 4: Spektrogram signálu okamžité úhlové rychlosti, B

# POSLEDNÍ NÍZKOTLAKOVÉ STUPNĚ PARNÍCH TURBÍN S TRANSSONICKÝM A SUPERSONICKÝM PROUDEM PÁRY

## TRANSONIC AND SUPERSONIC STEAM FLOW OF THE LAST TURBINE STAGES

Jaroslav Synáč

Katedra energetických strojů a zařízení, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni

### Abstrakt

Poslední nízkotlakové stupně jsou obtékány transsonickým nebo i supersonickým proudem mokré pracovní páry. Jsou uvedeny ztráty transsonického a supersonického proudu pracovní páry, které jsou generovány v lopatkových kanálech posledních stupňů. Příspěvek se také zabývá zvýšením výkonu, modernizací průtočných částí parních turbín jaderných elektráren Dukovany a Temelín, se zaměřením na přínos modernizace posledních nízkotlakových stupňů.

### Abstract

The transonic or supersonic flow of working wet steam is detected in the last stages of steam turbines low pressure parts. In text below there are presented losses generated in a turbine airfoil channel by transonic or supersonic flow. Next is modernization of turbine flow path discussion focused on the last stages of steam turbine commission on Czech nuclear power stations Dukovany and Temelin. Total power output profits of steam turbines are presented.

### Transsonický a supersonický proud pracovní páry

Poslední turbínové stupně parních turbín velkých výkonů jsou charakteristické transsonickým a u extrémně dlouhých oběžných lopatek, supersonickým proudem mokré pracovní páry. Přejít proud přehřáté do mokré páry probíhá v závislosti na rychlosti proudu, chemické čistotě napájecí vody v nukleačních stupních. To jsou zpravidla nízkotlakové předposlední stupně. Návrhové rozdělení entalpického spádu respektuje rozváděcí lopatku jako nukleační. Tato primární kondenzace vzniká přechodem mezní křivky (resp. pod Wilsonovu linii v závislosti na tzv. podchlazení). Vytváří směs páry a kapek vody o velikosti 1 až 2  $\mu\text{m}$ , se kterou pracují stupně za nukleačním stupněm. Primární kondenzace způsobuje sice termodynamickou ztrátu, ale protože trajektorie málo hmotných kapiček je shodná s trajektorií páry, nezpůsobí erozi následující oběžné lopatky. Ztráta nukleačního stupně vlivem vlhkosti je však násobně větší a lze ji omezit snížením rychlosti expanze proudu do subsonické hodnoty.

Sekundární kondenzace vzniká usazením kapek primární kondenzace a následným rozpadem vodních filmů na povrchích průtočné části. Spektrum kapek s velikostí 5 až 10  $\mu\text{m}$  obsahuje i relativně velké kapky 85 až 180  $\mu\text{m}$ . Protože jsou hmotné, jejich trajektorie je odlišná od parní fáze, a kromě ztrát způsobují erozi oběžných lopatek. V parní turbíně se odstředěná vlhkost odvádí odvodněním z povrchu statoru, u posledních stupňů pak štěrbinami duté rozváděcí lopatky do vnější části difuzoru a dále do kondenzátoru. Tato aktivní erozní ochrana se kombinuje, pokud je to možné, s pasivní erozní ochranou. Nejjednodušší je zakalení náběžné hrany, nebo lépe nanášení ochranného povlaku při co nejmenším vnesení tepla do základního materiálu oběžné lopatky.

Transsonický proud pracovní páry se objevuje u všech posledních i předposledních turbínových stupňů. Poslední stupeň s délkou oběžné lopatky 1220 mm (48") je ještě plně „transsonickým stupněm“. To znamená, že po celé délce oběžné lopatky má pracovní mokrá pára subsonickou a na výstupu z lopatky supersonickou rychlost při nominálním režimu. Geometrický tvar profilů lopatky respektuje omezení negativního vlivu interakčních ztrát rázovou vlnou generovanou odtokovou hranou sousedního profilu s mezní vrstvou na podtlakové straně profilu. Tato interakce vede vždy k zesílení impulzové tloušťky mezní vrstvy a úměrnému vzrůstu ztrát.

Nesmí dojít k odtržení mezní vrstvy a tím k enormnímu vzrůstu ztrát. Předpokladem je zajistit, v porovnání s laminární, interakci rázové vlny s adhezivnější turbulentní mezní vrstvou. Supersonický průtok pracovní mokré páry se objevuje asi v 10 % délky listu oběžné lopatky 1375 mm (54°). Představu o struktuře supersonického průtoku v na špičce této lopatky dává interferogram na obr. 1. Náběžná hrana generuje odlehlou kolmou rázovou vlnu, za kterou je proud subsonický (zelená oblast) s následnou silnou expanzí. Příslušné energetické ztráty v porovnání s následnými interakčními však nejsou významné. Pro vstupní hodnotu Machova čísla 1,45 jsou menší než 2 %, viz obr. 2. Součinitel ztrát kinetické energie je definován rovnicí (1):

$$\zeta = 1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_{2is}^2}, \quad (1)$$

kde izentropické Lavalovo číslo je definováno rovnicí (2):

$$\lambda_{2is} = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_{2s}}{p_{1t}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (2)$$

$\kappa$  je poměr tepelných kapacit ( $\gamma$  na obr. 2),  $\lambda$  je Lavalovo číslo proudu,  $p_{2s}$  a  $p_{1t}$  jsou tlaky, statický za resp. totální před profilovou mříží.

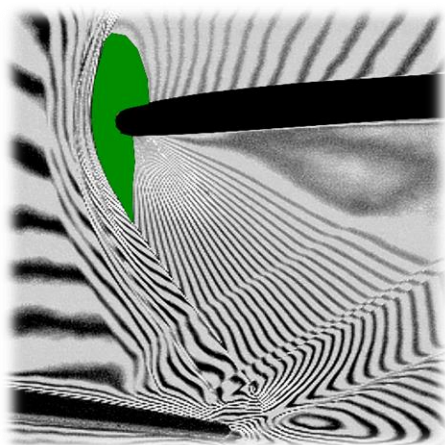
### **Přínosy aplikace nových posledních nízkotlakových stupňů v českých jaderných elektrárnách**

V jaderné elektrárně Dukovany (EDU) pracuje celkem 8 parních turbín s původním nominálním výkonem 220 MW jedné turbíny. Turbíny pracují se sytou vodní párou a s otáčkami rotoru 50 Hz. Modernizaci posledních turbínových stupňů provedl plzeňský Doosan Škoda Power. Původní poslední oběžná lopatka se 2 tlumícími vazbami průvlečným drátem na obr. 3, byla nahrazena novou volnou oběžnou lopatkou s transsonickými profily na obr. 4. Podobný způsob profilování byl použit i pro rozváděcí lopatky posledního stupně a pro předposlední stupeň.

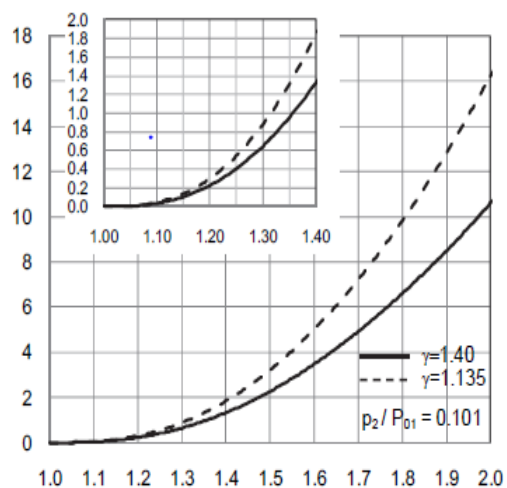
Jaderná elektrárna Temelín (ETE) je a na rozdíl od EDU monobloková. Pracují zde 2 parní turbíny vyrobené v plzeňské Škodovce s původním nominálním výkonem 1000 MW jedné turbíny. Turbíny pracují se sytou vodní párou a s otáčkami rotoru 50 Hz. Modernizaci nízkotlakových stupňů provedl, podobně jako v EDU, plzeňský Doosan Škoda Power. Původní volná oběžná lopatka posledního stupně bez tlumících vazeb drátem na obr. 5, byla nahrazena novou lopatkou s délkou pracovního listu 1220 mm (48°) drátem na obr. 6. Tato lopatka je tlumena 2 tlumícími vazbami, středovou výčnělkovou vazbou a bandáží na špičce pracovního listu. Radiální vůle je definována vůlí mezi těsnícím břitem bandáže lopatky a statorem. Současně byla přepracována celá průtočná část nízkotlakového dílu. Původní 4 stupně v každém proudu byly nahrazeny pětistupňovým uspořádáním s novými oběžnými i rozváděcími lopatkami, na obr. 7. Také přínos nových nízkotlakových dílů vedl k tomu, že v únoru roku 2016, při nízké teplotě chladící vody a odpovídajícímu nízkému tlaku v kondenzátoru, dosáhla parní turbína rekordního výkonu 1100 MW.

V tabulce 1, jsou přínosy modernizací parních turbín jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Celkový nárůst výkonu o 381 MW je významným zvýšením výrobní kapacity elektrické energie České republiky. Úspěšná modernizace celé průtočné části turbín, včetně nového typu radiálního těsnění stupňů a moderních vysokotlakových rozváděcí lopatek spolu s výše popsanou rekonstrukcí nízkotlakových dílů, dokumentuje nejen zkušenosti ale i vysokou aktuální úroveň znalostí přeměny tepelné energie v kinetickou. Patří k nim i znalost chování pracovní přehřáté a mokré páry v aplikaci na zvyšování účinnosti, dlouhodobé provozovatelnosti a spolehlivosti parních turbín Škoda.





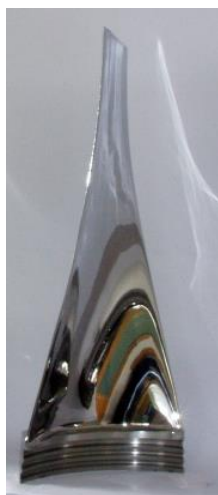
Obr. 1: Supersonický průtok v profilové mříži (laboratoř ÚT AVČR Nový Knín)



Obr. 2: Energetický ztrátový součinitel v [%] kolmé rázové vlny



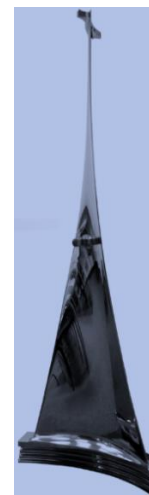
Obr. 3: EDU původní oběžná lopatka posledního stupně



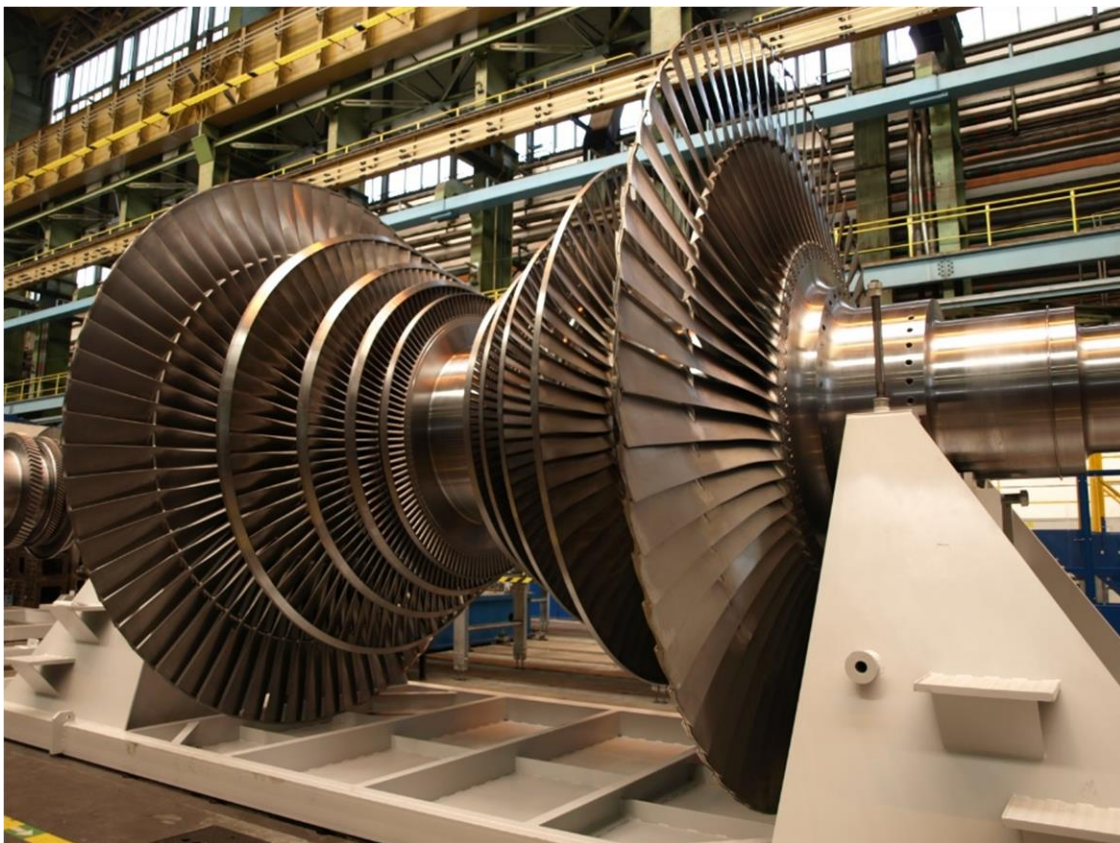
Obr. 4: EDU nová oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 5: EJE původní oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 6: EJE nová oběžná lopatka posledního stupně



Obr. 7: Nový nízkotlakový olopatkový rotor pro parní turbínu ETE

Tabulka 1: Celkový přínos modernizací EDU a ETE

	Navýšení výkonů modernizací	Celkem
Dukovany (EDU)	8 x 29 MW	232 MW
Temelín (ETE)	2 x 74,5 MW	149 MW
Celkem		381 MW

### Poděkování

V článku prezentované výsledky a výstupy byly finančně podpořeny programem na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON, TAČR TH2020057, Podprogram 2 Energetika a materiály.

# MONITOROVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ VE STATOROVÉM VINUTÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ

## PARTIAL DISCHARGE MONITORING OF SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR WINDING

Oto Mareček, Miloš Kaška a Milan Kasárník

TES s.r.o., Pražská 597, 674 01 Třebíč

### Abstrakt

Výskyt částečných výbojů vypovídá o postupné degradaci izolačního systému statorového vinutí. Úroveň částečných výbojů je závislá na kvalitě izolace, uložení v drážkách a kvalitě polovodivé složky izolace. Postupně s degradací izolačního systému a s jeho stárnutím dochází ke zvyšování úrovně těchto výbojů. Tyto výboje mohou v konstrukčně slabém místě vytvořit podmínky pro vznik vodivé cesty a následný zkrat. Cílem on-line měření částečných výbojů statorového vinutí synchronních generátorů 1125 MW je včasná predikce závady izolačního systému generátoru ještě před rozvinutím závažné poruchy [1, 4].

### Abstract

The presence of partial discharges indicates advancing degradation of stator winding insulation system. The level of partial discharges depends on the insulation quality, the quality of location in the grooves and quality of semi-conductive layer of the insulation. As the degradation and aging process of insulation system progresses the level of partial discharges increases. The discharges may create conditions for emergence of conductive path and subsequent short circuit especially where the structure is weak. The aim of on-line measurement of partial discharges of synchronous 1125 MW Generator stator winding is to provide an early prediction of the generator insulation failure well before the significant malfunction may occur.

### Úvod

On-line systém monitoringu částečných výbojů synchronních generátorů 1125 MW typu 2H 682972/2-VH provádí měření částečných výbojů ve vinutí statoru generátorů v jednotlivých fázích přímo za chodu generátoru. Následně jsou naměřená data prostřednictvím datově komunikačního kanálu přenášena do nadřazeného monitorovacího systému elektro NEMES. Systém NEMES pak naměřená data (částečné výboje generátorů) zpracovává tak, že se provádí:

- archivace a vyhodnocení naměřených hodnot,
- synchronizace s ostatními měřeními analogovými a dvouhodnotovými signály,
- vizualizace dat software prostředky (WEB rozhraní) systému NEMES,
- rozesílání navolených varovných a alarmových hlášek (e-mailové služba),
- časová synchronizace se systémem jednotného času GPS [1].

V následujících kapitolách je ve stručnosti popsána teorie výskytu a měření částečných výbojů ve statorovém vinutí generátorů, princip a vlastní on-line systém měření částečných výbojů instalovaný na generátorech a prezentace výsledků měření za období let 2015 až 2017.

### Teorie částečných výbojů generátorů

Částečné výboje jsou obecně elektrické výboje, které vznikají přechodnou ionizací plynu v mezerách izolačních systémů, jakmile elektrické namáhání překročí kritickou hodnotu napětí v oblasti nehomogenity prostředí. Synchronní generátory, které nebyly správně impregnovány, nebo byly v provozu řadu let při vysokých teplotách, mají tendenci ke vzniku plynových mezer (nehomogenit) v rámci izolace statorového vinutí v drážkách. Částečné výboje se budou tvořit

v těchto plynových mezerách za předpokladu překročení průrazného napětí mezery a vzniku volných elektronů [1].

Charakteristickou vlastností částečných výbojů je velmi rychlá nástupná hrana, vysoká frekvence po dobu trvání řádově desítky nanosekund a rychlé odeznění. Tyto výboje se opakují několikrát za dobu poloviny periody střídavého napětí. Na základě detekce velikosti a umístění částečných výbojů ve srovnání s kladnou a zápornou půlperiodou fázového napětí statoru generátoru lze také identifikovat oblast výskytu nehomogenit uvnitř izolace mezi vinutím a drážkou statoru: na povrchu vinutí, uvnitř izolace, na povrchu drážky statoru, případně mezifázová nehomogenita v čelech vinutí [1].

Příčinou vzniku nehomogenit izolace může být řada degračních poruchových mechanismů. Patří mezi ně především tepelná degradace izolace, časté změny zátěže stroje, chybná impregnace stroje, volné vinutí a nedostatečné odstupy vinutí [1].

Pro analytické hodnocení částečných výbojů je důležité hledisko provozních technologických podmínek, protože jen za shodných provozních podmínek je možné porovnávat jednotlivé záznamy a vyhodnocovat trendy změn jednotlivých parametrů [1].

### **On-line systém částečných výbojů generátorů 1125 MW**

Pro on-line měření částečných výbojů dvou generátorů 1 a 2 (1125 MW, typ 2H 682972/2-VH) byly instalovány diagnostické přístroje TurboGuardII TCZ. Měřené úrovně částečných výbojů jsou následně přenášeny datovou komunikací do nadřazeného monitorovacího systému NEMES za účelem vizualizace, vyhodnocení a archivace.

Přímo ve vinutí statoru generátorů bylo instalováno celkem 6 ks SSC (Stator Slot Couplers) snímačů, vždy po dvou do každé fáze (vinutí statoru generátorů je konstrukčně řešeno jako dvojitá hvězda). Drážkový vazební člen – SSC snímač je nízkonapěťové směrové anténní zařízení, které detekuje elektromagnetickou energii z částečných výbojů. Každý SSC snímač má dva výstupy určené pro měření částečných výbojů, k nimž dochází ve statorové drážce (Slot) a v oblasti výstupu vinutí (EW – end winding). Tyto signály jsou pak pomocí koaxiálních kabelů přes plynotěsné průchodky (generátor je chlazený vodíkem) vedeny do analyzátoru (diagnostického přístroje). Do přístroje je také přiveden synchronizační signál (napětí statoru generátoru) určený pro přiřazení impulsů částečných výbojů k průběhu napětí a následně identifikaci oblasti výskytu nehomogenit uvnitř izolace. Prostřednictvím datové komunikace s nadřazeným systémem NEMES, určené pro přenos dat, jsou zpětně do analyzátoru on-line předávané hodnoty důležitých technologických veličin: činný a jalový výkon generátoru, napětí generátoru, teplota chladicí vody a tlak vodíku [1].

Aktuální hodnoty úrovně částečných výbojů pro jednotlivé drážky statorového vinutí generátoru, v nichž jsou umístěny SSC snímače, jsou vizualizovány prostřednictvím WEB rozhraní systému NEMES, viz obr. 1, včetně možnosti zobrazení časových trendů, viz obr. 2. Pro podrobnou analýzu velikosti a umístění částečných výbojů ve srovnání s kladnou a zápornou půlperiodou fázového napětí statoru generátoru za účelem identifikace oblasti výskytu nehomogenit uvnitř izolace mezi vinutím a drážkou statoru je využíván software PDView3 (součást dodávky diagnostického přístroje). Tento software je instalován na serveru systému NEMES.

### **Vyhodnocení měření částečných výbojů za období let 2015 až 2017**

U obou generátorů 1 a 2 byla v období let 2015 až 2017 on-line měřena a vyhodnocována úroveň částečných výbojů ve vinutí statoru generátorů. Souhrnné výsledky pro měření v první fázi (U) za toto období jsou uvedeny v tabulce 1. Pro celkové zhodnocení stavu izolačního systému statoru generátorů se využívá hodnot  $Q_m$  [mV]. Výrobce analyzátoru doporučuje provádět porovnání s úrovní hodnot  $Q_m$  podobných generátorů.

U generátoru 1 jsou hodnoty  $Q_m$  v první fázi v drážce (Slot) č. 42 hodnoceny jako vysoké, protože 95 % sledovaných generátorů těmito analyzátory vykazuje nižší hodnoty. Stejně hod-

nocení platí pro čela vinutí (EW). V tabulce 1 jsou tyto hodnoty podbarveny šedou barvou. Ve druhé a třetí fázi jsou hodnoty  $Q_m$  v drážkách (Slot) hodnoceny jako průměrné ( $< 90\%$ ) a v čelech vinutí (EW) jako malé ( $< 50\%$ ). Rozložení impulsů částečných výbojů v první fázi v drážce (Slot) č. 42 vzhledem k periodě střídavého napětí odpovídá fázi a četnosti těchto impulsů typické aktivitě částečných výbojů uvnitř izolačního systému, viz obr. 3. Z uvedeného vyplývá, že izolační systém generátoru 1 je v horším stavu, avšak stabilizovaný, protože ve sledovaném období nebyly zjištěny jakékoli rostoucí trendy. [1, 2, 3]

U generátoru 2 jsou hodnoty  $Q_m$  hodnoceny jako zanedbatelné, protože jen 25 % generátorů, sledovaných těmito analyzátoři, vykazuje takto nízké hodnoty, a to jak v drážkách, tak v čelech vinutí. Po dobu měření nebyly zjištěny žádné známky možného zhoršeného stavu izolačního systému generátoru 2 [1, 2, 3].

## Závěr

On-line měření částečných výbojů velkých synchronních generátorů, jako jsou generátory 1125 MW typu 2H 682972/2-VH, patří v současné době k základním diagnostickým metodám vypovídajícím o stavu izolace statorového vinutí, včetně možnosti včasného varování na blížící se poruchu. Jako velmi užitečné se také jeví datové spojení s nadřazeným monitorovacím systémem NEMES především pro uživatelsky příjemný přístup k měřeným datům a možnosti rychlého vyhodnocení aktuálního stavu včetně časových trendů.

## Literatura

- [1] Kasárník, M. (2015): *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1000 MW na ETE (od uvedení do provozu za kampaň 2014 – 2015)*. Třebíč: TES s.r.o.
- [2] Kasárník, M. (2016): *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2015 – 2016)*. Třebíč: TES s.r.o.
- [3] Kasárník, M. (2017): *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2016 – 2017)*. Třebíč: TES s.r.o.
- [4] Kasárník, M. (2017): *Metodika pro výběr, zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE*. Třebíč: TES s.r.o.

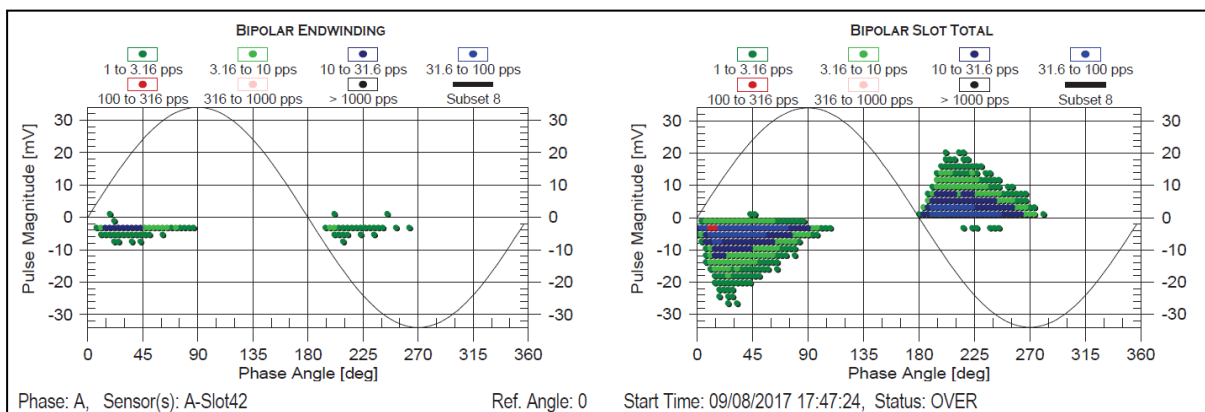
Automatický rozsah														Částečné výboje generátoru ISP01D001 - automaticky volené citlivosti (měřicí modul INEMES-CVTG_A.1)													
Fáze	Senzor	Drážka	Citlivost [mV]	EW NQN+	EW NQN-	EW Q <sub>m</sub> <sup>+</sup>	EW Q <sub>m</sub> <sup>-</sup>	Slot NQN+	Slot NQN-	Slot Q <sub>m</sub> <sup>+</sup>	Slot Q <sub>m</sub> <sup>-</sup>	Stav měření	Čas měření [UTC+1h]														
U	U1	42	20-340	0	0	0	0	23.52	35.99	36	36	OK, Hodnoty přesáhly alarmovou mez (Alarm)	30.08.2018 13:23:31														
V	V1	14	50-850	0	0	0	0	0	0	0	0	OK, Impulzy pod rozsahem (UND)	30.08.2018 13:23:31														
W	W1	28	10-170	0	0	0	0	0	4.77	0	0	OK, Impulzy nad rozsahem (OVR)	30.08.2018 13:23:31														
U	U2	27	10-170	0	0	0	0	0	0	0	0	OK, Impulzy pod rozsahem (UND)	30.08.2018 13:23:31														
V	V2	41	10-170	0	0	0	0	6.02	13.42	0	11	OK	30.08.2018 13:23:31														
W	W2	13	10-170	0	0	0	0	0	0	0	0	OK, Impulzy nad rozsahem (OVR)	30.08.2018 13:23:31														
Provozní parametry generátoru ISP01D001 (zdroj parametrů: systém INEMES-ASRU_A)																											
P [MW]		Q [MVA]		U <sub>C</sub> [kV]		t [°C]		P <sub>H</sub> [kPa]																			
1071		31		23.43		33		510						30.08.2018 13:28:30													
Provozní parametry diagnostického přístroje																											
t [°C]																											
54.8														30.08.2018 13:28:30													
Alarmové PD meze Q <sub>m</sub> v TurboGuard přístroji																											
nízká		vysoká		velmi vysoká																							
7 mV		18 mV		29 mV																							

Obr. 1: WEB rozhraní NEMES – úroveň částečných výbojů





Obr. 2: WEB rozhraní NEMES – trendy částečných výbojů v čase



Obr. 3: Rozložení impulsů částečných výbojů vzhledem k periodě střídavého napětí

Tabulka 1: Výsledky měření částečných výbojů za období let 2015 až 2017

Rok	Generátor 1			Generátor 2		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
P [MW]	1091	1085	1080	1080	1092	1090
U [kV]	23,1	23,4	23,5	23,4	23,6	23,5
T [°C]	24	26	27	27	27	26
P-H2[kPa]	507	512	508	500	506	509
Fáze / drážka	U1 / 42			U1 / 42		
Slot Qm+ [mV]	19	19	22	0	0	0
Slot Qm- [mV]	17	19	22	0	0	0
EW Qm+ [mV]	2	0	0	0	0	0
EW Qm- [mV]	5	7	6	0	0	0
Fáze/drážka	U2 / 27			U2 / 27		
Slot Qm+ [mV]	4	7	6	0	0	0
Slot Qm- [mV]	3	7	6	0	0	0
EW Qm+ [mV]	0	0	0	0	0	0
EW Qm- [mV]	0	0	0	0	0	0

# HODNOCENÍ PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI Z POHLEDU PRIMÁRNÍCH DAT

## EVALUATION OF THE OPERATIONAL DATA FROM THE PRIMARY DATA POINT OF VIEW

Jan Kamenický, Pavel Ságl a Jaroslav Zajíček

Technická univerzita v Liberci

### Abstrakt

Hodnocení provozní spolehlivosti je činnost, která se neobejde bez příslušných datových zdrojů. Tato data významně souvisí s řešením provozní spolehlivosti, mají tedy svá specifika, která jsou stručně popsána v následujícím příspěvku.

### Abstract

Evaluation of the operational dependability is such an activity that needs to be based on relevant data sources. Those data significantly corresponds with the solution of operational dependability so they have its own specificities, which are described in the following contribution.

### Základní informace o hodnocení provozní spolehlivosti

Technická univerzita v Liberci (TUL) provádí dlouhodobé sledování provozní spolehlivosti Systému kontroly a řízení (SKŘ) pro jadernou elektrárnu Dukovany (EDU) [1] a Temelín (ETE) [2]. S touto činností souvisí rovněž produkce dalších technických podpor, které TUL dle potřeby rovněž poskytuje.

Nejprve velmi stručně uvádíme základní informace o hodnocení provozní spolehlivosti pro EDU a ETE.

Hodnocení provozní spolehlivosti technického celku lze řešit takovým způsobem, aby se v první řadě získaly podstatné informace o rozsahu (seznamu, registru) hodnoceného zařízení. Potom zpravidla následuje zjištění relevantní poruchovosti tohoto celku, které již přináší první významné spolehlivostní informace a výstupy. Přístupů v postupu hodnocení je více, záleží na charakteru hodnoceného zařízení, jeho specifik, požadavků provozovatele, legislativě atd. Významnými hledisky jsou zde zejména bezpečnost provozu, ekonomika atd.

### Seznam hodnoceného zařízení (registr)

Znalost úplného seznamu hodnoceného zařízení je logickým požadavkem pro jeho hodnocení – například po spolehlivostní stránce. Tím je dáno, k jakým částem zařízení a jakým způsobem se budou vázat postupy spolehlivostních analýz a následně i výstupní produkty. V neposlední řadě bude registrem rovněž vymezen rozsah základních a dále nedělitelných „stavebních prvků“ zařízení, které budou určeny například výrobními typy a k nim potom budou přiřazeny spolehlivostní ukazatele.

Seznam zařízení lze získat různými způsoby, např.:

- a) dekompozicí zařízení podle jeho fyzického složení,
- b) dekompozicí podle bezpečnostních hledisek,
- c) dekompozicí podle ekonomických hledisek,
- d) dekompozicí funkční, tj. s ohledem na jeho významné funkce,
- e) kombinací uvedených metod.



## Relevantní poruchovost hodnoceného zařízení

Poruchovost sledovaného zařízení je druhou významnou a nutnou skupinou údajů pro hodnocení provozní spolehlivosti a lze je k seznamu hodnoceného zařízení vázat například dle následující struktury:

- a) zařízení jako celek,
- b) významné součásti zařízení dle jeho funkce, umístění, určení, složení atd.,
- c) součástky a součásti zařízení (výrobní typy), jakožto nejmenší jeho celky.

Rozpad hodnoceného zařízení pro analýzu provozní spolehlivosti souvisí s tím, aby bylo možno zejména kvalitně a komplexně pokrýt základní provozní situace s ohledem na rozsah sledovaného zařízení, jeho funkčnosti a v souladu s jeho základními charakteristikami vyplývajícími z provozního chování, spolehlivosti, bezpečnosti provozu, ekonomičnosti atd.

## Základní výstupy spolehlivostního hodnocení

Základní parametry a výstupy procesu hodnocení provozní spolehlivosti by měly úzce souviset s vlastnostmi sledovaného celku. Obecně lze za úvodní základní výstup označit prostou poruchovost vázanou na vhodně zvolené celky dle konkrétní struktury sledovaného zařízení. Dalšími často stanovovanými parametry jsou potom bodové odhady ukazatelů bezporuchovosti, například střední doba provozu mezi poruchami (MTBF), intenzita poruch a následně intervaly konfidence pro tyto parametry. Pokud se hodnotí vysoce spolehlivé zařízení, kde počty poruch jsou nízké (typickým příkladem jsou elektronické karty a další zařízení SKŘ EDU a ETE), lze pro postup stanovení ukazatelů spolehlivosti využít ČSN IEC 60605-4 [3]. Další popis postupu a použití matematického aparátu, který vychází zejména z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky, zde již nebude uváděn, protože by to bylo nad rámec a rozsah tohoto článku.

Jsou-li k dispozici projektové hodnoty minimálních MTBF, je potom možné v další fázi hodnocení provést porovnání, zda zjištěné hodnoty provozní MTBF nejsou u některých komponent nižší, než tyto projektové minimální hodnoty. Tím jsou ale zatím podchyceny pouze nejzákladnější stavební prvky a celky hodnoceného celku. Spolehlivostní analýzu je třeba dále rozpracovat do lepšího souladu s typickými funkčními a základními specifiky hodnoceného celku. Návazná hodnocení a analýzy proto využívají uvedených a rovněž i dalších ukazatelů a směřují například k rozboru vybraných funkcí, které zabezpečuje sledované zařízení. Hodnocení spolehlivosti vybraných funkcí je potom vrcholovým výstupem z pohledu významnosti spolehlivostní analýzy vybraného celku a jeho základních funkcí.

## Primární data pro hodnocení provozní spolehlivosti a jejich získávání

Rozsah primárních dat pro úspěšné provedení analýzy provozní spolehlivosti zvoleného technického (ale i jiného) celku úzce souvisí s tím, co je třeba určit, spočítat a vyhodnotit. Je tedy zřejmé, že v souladu s předcházející kapitolou se první základní skupinou dat stávají data pro stanovení seznamu sledovaného zařízení (registru), a to do takového detailu, ke kterému je hodnocení cíleno. Zpravidla to bývají takové komponenty, které provozovatel vyměňuje jako celek a neřeší jejich okamžité demontáže a opravy.

Další skupinou významných primárních dat, která jsou nezbytná pro spolehlivostní analýzu a navazují na získaný registr zařízení, jsou informace o relevantních zásazích údržby. Provozovatel zařízení by měl mít kvalitně postavenou servisní smlouvu, nejlépe přímo u výrobce dodaného zařízení, který by řešil záruční a následně rovněž pozáruční náročnější zásahy a opravy. Provozovateli by potom zůstala možnost provádět jednodušší zásahy, kterými jsou seřízení, vyčištění, kalibrace, testování, resety, restarty atd. Je evidentní, že optimální vyladění vztahu je poměrně důležitým bodem z více důvodů a rovněž z pohledu hodnocení provozní spolehlivosti.

Získání dat o údržbě zařízení však nemusí být vždy jednoduché. Jednak může dojít k tomu, že u nově instalovaného a do provozu prvně uváděného zařízení může mít výrobce (dodavatel) z různých důvodů pochopitelný zájem si zpočátku případné problémy a závady ohlídat. Při odpovědnosti dodavatele zajistit bezproblémovou a plnou funkčnost zařízení potom provozovatel nemusí disponovat kompletní databází těchto informací, které právě z uvádění do zkušebního a běžného provozu mají charakter velmi významných informací. Dále do procesu vstupuje garanční ujednání. Obecně lze konstatovat, že zde hodně záleží na smluvním ošetření a nastavení celého procesu. Další komplikací se může stát provázanost složitého zařízení, jakým SKŘ v jaderné elektrárně bezpochyby je. Projev poruchového stavu tak nemusí vždy jasně ukazovat na závadu konkrétní součástky nebo celku. Porucha se například může projevit krátkodobým alarmem, který rychle odezní. Kromě toho může dojít k tomu, že poruchový stav může být do SKŘ zavlečen poruchou jiného zařízení, které s ním určitým způsobem souvisí, například poruchou v technologii, manipulacemi, vlivem EMC atd.

Z uvedených informací vyplývá, že údržbářská data o funkčnosti, poruchách a dalších stavech zařízení jsou velmi významná, je třeba je vhodným způsobem sledovat, shromažďovat a vyhodnocovat. Velká část těchto dat se stává přímými vstupními údaji do hodnocení provozní spolehlivosti, a po jejich získání navazuje jejich další zpracování a hodnocení.

### **Historie a sběr dat pro hodnocení provozní spolehlivosti**

Technický pokrok znamenal ve svém průběhu u sběru a hodnocení primárních dat pro účel hodnocení provozní spolehlivosti obrovské změny. Na samém počátku této činnosti v oblasti SKŘ jaderných elektráren jsou první významné aktivity datovány cca k roku 1988 v SKŘ EDU, kdy se hodnotila provozní spolehlivost pro část původního (neobnoveného) SKŘ EDU. Tehdy se data získávala většinou z různých papírových podkladů a převážně ručně se tyto informace rovněž zpracovávaly, protože výpočetní technika se teprve vyvíjela a nebyla k dispozici v tak masovém měřítku, jako je tomu v současné době. Ovšem v EDU už tehdy začaly vznikat aplikace, databáze a další nové prostředky, které byly naplňovány významnými provozními daty, ze kterých bylo možné začít čerpat data o registru zařízení a relevantní poruchovosti. Přirozeně tyto prostředky nebyly primárně určeny ke sledování provozní spolehlivosti, byly to například evidence o zásazích údržby, náhradních dílech (dB SRND, SIS) atd. Bylo však možné tato data po příslušných úpravách a doplnění začít využívat pro získání některých vstupních dat pro hodnocení provozní spolehlivosti. Nejdříve však bylo nutné zjistit, kde a jaká data a aplikace jsou k dispozici, protože jejich vznik a existence měly zpočátku někdy poněkud živelný charakter a překrývaly se. Proces jejich vzniku a vývoje bylo třeba sledovat, dle možností příslušnými způsoby ovlivňovat, k čemuž bylo současně třeba operativně a co nejčastěji data stahovat a analyzovat, i když byla v různé kvalitě a obsahu.

Technická univerzita v Liberci měla vždy zájem na tom, aby data, která byla významná ze spolehlivostního pohledu a disponovala již jistou kvalitou, byla podchycena vhodnou aplikací. Od této aplikace se požadovalo, aby data nejenom shromažďovala, ale současně aby rovněž nabídla takové možnosti jejich zpracování, které byly proveditelné a vedly ke snadnému a automatizovanému získání základních spolehlivostních výstupů. Úkol byl orientován právě na spolehlivostní hodnocení původního SKŘ EDU. První aplikace se jmenovala SSS (Systém sledování spolehlivosti). Pro načtení aktuálních dat byl potřebný zásah oprávněného uživatele čili nejednalo se o zpracování on-line, formát, kvalita a rozložení dat to tehdy ještě neumožňovalo. Ve srovnání s papírovými podklady a jejich ručním zpracováním byl však toto značný pokrok a zefektivnění procesu. Zavedení a funkčnost aplikace SSS bylo též pozitivně hodnoceno SÚJB, kam EDU mělo a stále má povinnost předávat základní spolehlivostní hodnocení SKŘ.

## Dukovany, Temelín a moderní přístup v hodnocení provozní spolehlivosti SKŘ

Rozvoj výpočetní techniky, zpracování dat, ukládání dat a další technický pokrok šel však rychle a stále dál.

V roce 2000 byl spuštěn 1. blok ETE, který byl v rámci SKŘ postaven na tehdy moderním zařízení Westinghouse. V letech 2005 byla zahájena rozsáhlá modernizace SKŘ v EDU. V obou elektrárnách byl již zaveden informační systém ISE PassPort, který se stal mocným nástrojem například pro řízení prací, jeho využitím lze zajistit rovněž získávání, zpracovávání a archivaci příslušných dat v rozsáhlé podobě. Tj. v hodnocení provozní spolehlivosti nejen pro vytvoření registru zařízení, ale i relevantních údržbářských zásahů. Vznikl tak prostor pro další kvalitu a možnosti sbírání a zpracovávání dat, která jsou potřebná nejen pro hodnocení provozní spolehlivosti.

V roce 2007 byl proto vytvořen nový SSS, který dokázal data pro hodnocení provozní spolehlivosti SKŘ sbírat a vyhodnocovat, a to v nové kvalitě a rozsahu z ISE PassPortu a pro obě elektrárny on-line. Otevřely se další možnosti zpracování, rovněž i další zadání a další možné výstupy. Kromě cenzorického rozhodnutí, zda se u dat, které nabrala aplikace podle stanoveného schématu, jedná skutečně o poruchy, již aplikace produkovala příslušné výstupy pro hodnocení provozní spolehlivosti bez dalšího zásahu.

Dále byla vytvořena možnost data pro hodnocení spolehlivosti rovněž získávat mimo aplikaci SSS, a to zabezpečeným připojením s využitím Internetu v podobě přesně definovaných datových exportů. Tento postup bylo nutné vytvořit zejména z důvodu dalšího vývoje situace, překonání postupů dle SSS a z dalších praktických důvodů. Pro vlastní zpracování dat těchto exportů lze využívat například prostředky aplikací MS Office ve formě pro tato zpracování cíleně vytvořených modulů a aplikací. Výsledky potom ale nutně musí harmonizovat s výstupy z předešlých let, protože v rámci smysluplného sledování provozní spolehlivosti je třeba hodnocení provádět opakovaně, navazovat na předchozí výsledky, hodnotit trendy a sledovat vývoj poruchovostí, ukazatelů atd.

Spolehlivostní výstupy lze dále využívat pro další analýzy, výpočty a hodnocení, například pro plánování náhradních dílů. Připravují se další produkty, například automatizovaná alarmová hlášení, která spustí aplikace při zjištění nepříznivého vývoje spolehlivostních ukazatelů, překročení zadaných limitů atd.

### Závěrem

Cílem článku bylo stručným způsobem uvést, co je z pohledu primárních dat pro hodnocení provozní spolehlivosti SKŘ EDU a ETE důležité, jakým vývojem tato oblast prošla a jaké jsou další možnosti. Článek navazuje na předchozí články konferencí [4].

### Literatura

- [1] SágI, P., Zajíček, J. (2018): *Monitoring provozní spolehlivosti systémů kontroly a řízení JE Dukovany*. Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [2] Kamenický, J., SágI, P. (2018): *Monitoring provozní spolehlivosti systémů kontroly a řízení JE Temelín*. Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [3] ČSN IEC 60605-4:2002 *Zkoušení bezporuchovosti zařízení – část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly*.
- [4] Kolektiv autorů (2015): *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, sborník z 10. konference*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.

# NOVÁ DEFINICE KOROZNÍCH RIZIK PRO TURBÍNU A JEJÍ DIAGNOSTIKU

## NEW DEFINITION OF CORROSION RISK ASSESSMENT FOR TURBINE AND ITS DIAGNOSIS

Ivo Jiříček

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze (VŠCHT), Technická 5, 166 28 Praha 6

### Abstrakt

V práci je popsána současně používaná definice a klasifikace korozních rizik pro materiály turbín, která je nově doplněna o dvě kritéria. Vedle doporučení metodik pro odběr a analýzu nánosů je motivací vytvoření takových kritérií hodnocení, kterými by bylo možno identifikovat rizikové provozy, a úpravami jejich chemických režimů předcházet plošným a lokálním formám korozního napadení materiálů. Jako příklad může sloužit nedávná porucha turbíny, způsobená korozním účinkem nečistot z páry. Je ukázáno, že minulá praxe, kdy protokoly z analýz nánosů zůstávaly u objednatele a často se tak nedostaly na inkriminované provozy, nebyla optimální. Současná praxe ČEZ, vytvářející protokoly vstupující do databáze LTO's, je z tohoto hlediska krokem správným směrem.

### Abstract

Paper describes the currently used definition and classification of corrosion risk assessment for turbine materials, which is newly supplemented by two criteria. In addition to recommending methodologies for the collection and analysis of deposition, the motivation is to create evaluation criteria that would be able to identify the risk level of power plants units and modify their chemical regimes to prevent general and local forms of corrosive attack of materials. An example of this may be the recent turbine failure due to the corrosion effect of steam impurities. It is shown that past practice, when the deposit analysis protocols remained with the turbine producer and often did not reach the incriminated units, was not optimal. Current practice of CEZ, creating protocols entering the LTO's (Long-Time Operation) database, is in this respect a step in the right direction.

### Nová definice korozních kritérií

Z dosavadních výsledků plyne, že pro nestabilitu déle provozovaného L-1 stupně je největším rizikem důlková koroze od nedostatečně alkalizovaných (pufrovaných) chloridů a síranů v nánosu, menší riziko představuje selektivní a organická koroze. Navržené hodnocení pracuje s předpokladem, že při vymývání a zakoncentrování rozpustných složek v nánosu, celkové množství iontů v nánosu kolísá, jejich poměry však zůstávají přibližně stejné. V původně navrženém hodnocení jsou používány tři bezrozměrové indikátory: 1. indikátor koroze důlkové R1 [1], indikátor koroze selektivní R2 a indikátor koroze organické R3 [1].

Nedávná korozně-iniciovaná porucha turbíny elektrárny ČR však ukázala, že tyto kritéria nemusí být dostatečná. Na obr. 1 jsou uvedené vypočtené hodnoty kritérií R1, R2 a R3 z analýzy turbínového nánosů z NT stupně turbíny. Z těchto kritérií je překročeno pouze kritérium R2 v první akční úrovni, což by znamenalo další provoz turbíny hodnocení – provoz bez omezení. Turbína však reálně musela být odstavena, neboť se našlo větší množství trhlin a lomů v oblasti rotoru, tj. na rotorové oceli. Za příčinu byla označena existence volné silné báze (hydroxidu sodného a alkalických silikátů), která byla nalezena i na rozváděcích lopatkách stupně před Wilsonovou linií. Volná silná báze má vysoký potenciál pro vznik louhového křehnutí nízkolegovaných ocelí především v teplotním rozsahu od 100 do 350 °C.

Nově jsou proto navrhovaná dvě kritéria:

1. indikátor louhového křehnutí R4
2. indikátor geotermálně indukované koroze R5 – ve vývoji.

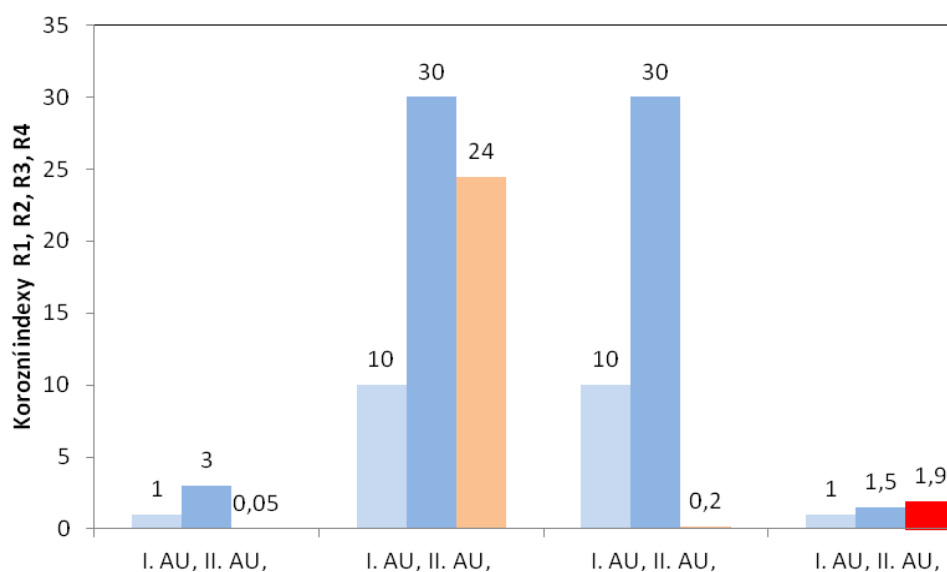
Výsledky vyhodnocení indikátoru R4 jsou uvedeny na obr. 1. Tento indikátor nově podchycuje riziko louhového křehnutí, přičemž pro daný nános z rozváděcích lopatek byl vyhodnocen v druhé akční úrovni. To by zároveň s R2 v I.AÚ znamenalo zavedení opatření před dalším provozem turbíny. Pokud by indikátor R4 existoval již před 4 roky, kdy se prováděla chemická analýza nánosů na příslušné turbíně se stejným výsledkem, mohlo být vzniku trhlin předejito. To ovšem pouze za předpokladu, že by se výsledky diagnostického hodnocení dostaly na příslušné elektrárně do správných rukou. K tomu však bohužel nedošlo a protokol skončil u zadavatele (výrobce turbín).

Z tohoto hlediska je nutno ocenit současnou praxi ČEZ, kdy díky projektu PŘS se protokoly vkládají do LTOs přes aplikaci Ukladač protokolů. Pro všechny kontroly v rámci materiálové diagnostiky turbín a generátorů se používá jedna šablona protokolu – „Protokol z kontroly TG“. Pro odběr nánosů na lopatkách turbín a jejich analýzu a vyhodnocení je protokol vypracován dle schválené šablony.

## Literatura

- [1] Šťastný, M., Bláhová, O., Jiříček, I., Lorenc, B. (2006): *Effect of Steam Chemistry on the Turbine Blades in the Phase Transition Zone*. Power Plant Chemistry, Vol. 8, No. 10.

Korozní index R1 – Korozní index R2 – Korozní index R3 – Korozní index R4



Obr. 1: Vyhodnocení korozních indexů R1, R2, R3 a R4 současně s vyznačením příslušných akčních úrovní

# VÝVOJ MOŘÍCÍCH INHIBITORŮ SNIŽUJÍCÍCH NEBEZPEČÍ VODÍKOVÉ KŘEHKOSTI

## DEVELOPMENT OF PICKLING INHIBITORS LOWERING DANGER OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT

Martina Pazderová<sup>a)</sup>, Petr Szelag<sup>b)</sup> a Alena Faltýnková<sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

<sup>b)</sup> Pragochema, spol. s r.o.

<sup>c)</sup> Czech Airlines Technics, a.s.

### Abstrakt

Práce se zabývala možností snížení vodíkové křehkosti, ke které dochází během procesu kyselého moření v důsledku navodíkování materiálu. Pro eliminaci procesu navodíkování bylo využito přídavku inhibitorů, které měly za následek snížení vývoje vodíku v průběhu procesu moření. Hodnocení inhibičního účinku přidaných látek probíhalo jednak pomocí elektrochemických zkoušek, měřením hmotnostních úbytků a v neposlední řadě pomocí sledování změn mechanických vlastností.

### Abstract

This study was focused on lowering of hydrogen embrittlement which is caused by pickling process. Different types of adsorption inhibitors were used as additives to pickling bath in order to prevent metal dissolution and related hydrogen evolution. The effect of inhibitors was tested by electrochemical and mechanical tests.

### Úvod

Moření je proces, který je využíván v rámci předúpravy povrchu a dochází při něm k odstranění oxidů a nečistot z povrchu materiálu. Parametry mořicí lázně jako jsou složení, koncentrace, teplota a doba moření jsou voleny na základě míry znečištění povrchu a složení materiálu. Inhibiční účinek vyvíjených látek byl studován jednak u jednotlivých inhibitorů a v dalších krocích bylo využito kombinace inhibitorů s přídavkem dalších látek s neinhibičním účinkem. Použité inhibitory byly na bázi aminů, iminů, tenzidů a komplexantů. V tabulce 1 je pro ilustraci uvedeno několik inhibitorů včetně základní komponenty, ze které inhibitor vychází.

Inhibitory byly testovány v kyselině chlorovodíkové a kyselině sírové, přičemž byl ověřován i vliv koncentrace inhibitoru.

Prvotní experimenty inhibiční účinnosti byly založené na metodě hmotnostních úbytků. Inhibiční účinnost byla stanovena podle následujícího vztahu.

$$\eta[\%] = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

kde  $G_0$  je hmotnostní úbytek získaný z měření v mořicí kyselině bez inhibitoru a  $G$  je hmotnostní úbytek s přídavkem inhibitoru.

### Experimentální část

Na základě výsledků prvotních experimentů byly vybrány inhibitory s nejvyšší účinností, které byly následně využity pro přípravu vzorků na zkoušení pomocí nepřímých metod – ověření změny mechanických vlastností prostřednictvím pulsátoru cyklického namáhání, zkoušky ASTM F 519.

Pulsátor cyklického namáhání je experimentální zařízení (obr. 1a), které bylo vyvinuto pro účely testování míry navodíkování po procesech povrchových úprav. Jako zkušební vzorky byly použity pojistné kroužky typu DIN 472 (obr. 1b). Z obrázku je zřejmé, že část vzorku byla mechanicky upravena, aby bylo zajištěno, že k prasknutí vzorku dojde přibližně na stejném místě. Principem zkoušky byla aplikace cyklického namáhání sinusového průběhu. Nastavovanými parametry byla frekvence a amplituda. Měřením byla získána informace o dosaženém počtu cyklů, tzn. u vzorků s vyšším počtem dosažených cyklů namáhání byl materiál méně zkrěhnutý vlivem navodíkování. Lze tak pozorovat pozitivní/negativní vliv inhibitorů prostřednictvím trendů v nárůstu/poklesu počtu dosažených cyklů. Na základě tohoto výsledku pak bylo možné porovnat průměrně dosažené počty cyklů v případě nemořených vzorků se vzorky exponovanými v mořicích kyselinách s přidávkou jednotlivých inhibitorů i bez nich. V grafu na obr. 2 jsou uvedeny výsledky, ze kterých jsou zřejmé trendy v případě vzorků mořených v 20% kyselině sírové s přidávkou různých inhibitorů.

Další použitou metodou bylo testování mechanických vlastností dle ASTM F 519. Zkušební zařízení je uvedeno na obr. 3a a vzorek předepsaného tvaru s definovaným zářezem je vidět na obr. 3b. Uvedená metoda je v praxi běžně využívána k pravidelné kontrole zejména u vysokopevnostních dílů. Pro experimentální účely byly vzorky standardně upnuty pod definovaným napětím a byla měřena doba kdy došlo k prasknutí. Následně byla hodnocena lomová plocha pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), aby bylo možné zjistit mechanismus poškození. Snímky vybraných lomových ploch jsou uvedeny na obr. 4a a obr. 4b. Na obr. 4a je na lomové ploše vzorku mořeného v kyselině chlorovodíkové možné pozorovat interkrystalické křehké porušení. Oproti tomu na lomové ploše vzorku mořeného za použití mořicího inhibitoru I (obr. 4b) jsou patrné důlky poukazující na tvárné porušení.

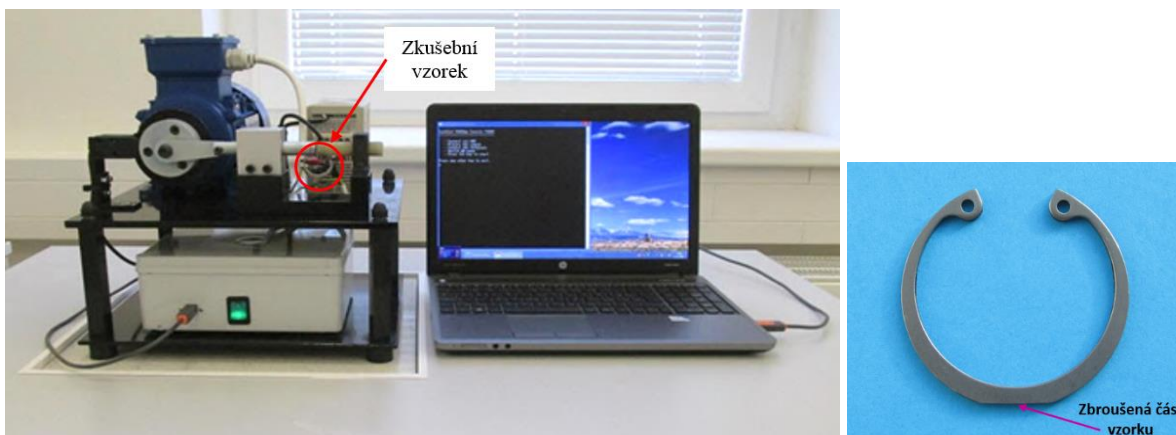
## Závěr

Experimenty potvrdily výbornou účinnost některých z inhibitorů a jejich kombinací, a proto se v budoucnu předpokládá jejich využití pro kyselé moření v neoxidujících kyselinách v komerčních procesech předúprav povrchů. Kromě vysoké inhibiční účinnosti a minimalizace navodíkování pevnostních ocelí byla při vývoji inhibitorů sledována i minimální toxicita složek inhibitorů a snadnost aplikace v reálných provozech.

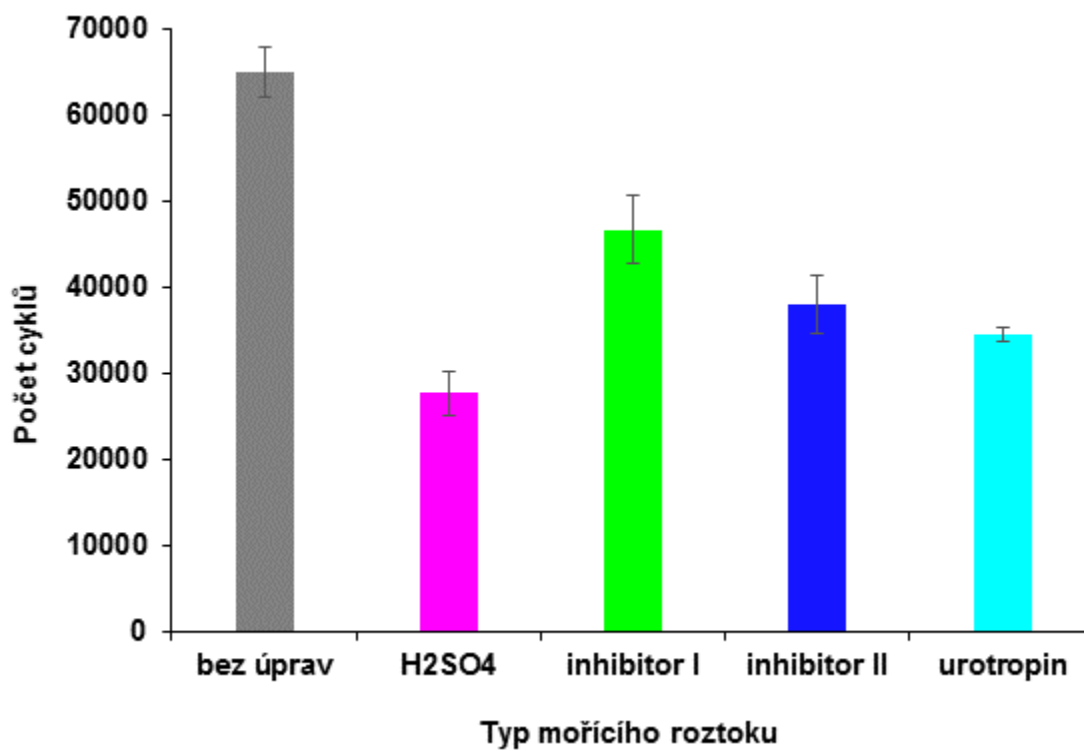
Tabulka 1: Inhibitory použité pro testování

Inhibitor	Složení
I	Směs inhibitorů + komplexantů + tenzidů
II	Dibenzylsulfoxid
III	Derivát imidazolu + neinhibiční látky
IV	Alkoxylovaný mastný amin
V	Polyethylenimin

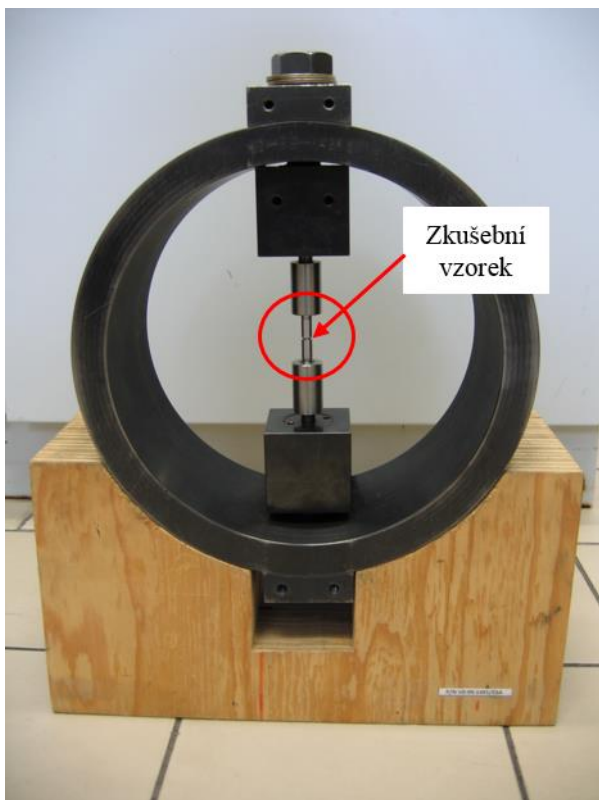




Obr. 1: a) Pulsátor cyklického namáhání – experimentální zařízení; b) Zkušební vzorek pro zkoušku cyklickým namáháním (pojistný kroužek pro díry, DIN 472)



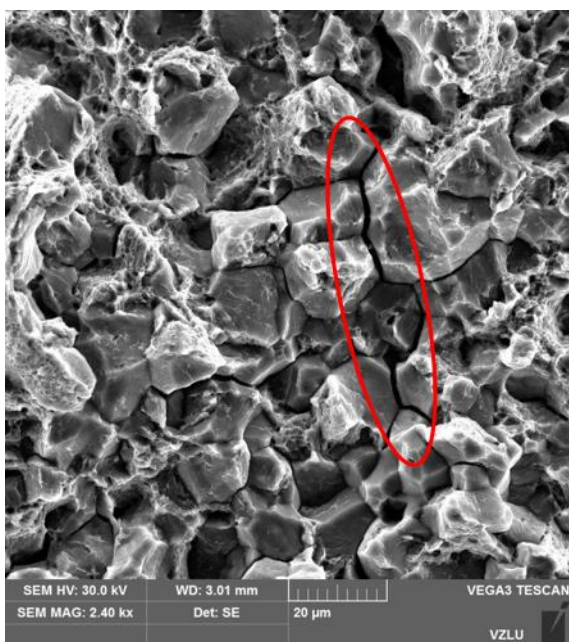
Obr. 2: Počet cyklů v závislosti na použitém mořícím inhibitoru ve 20% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



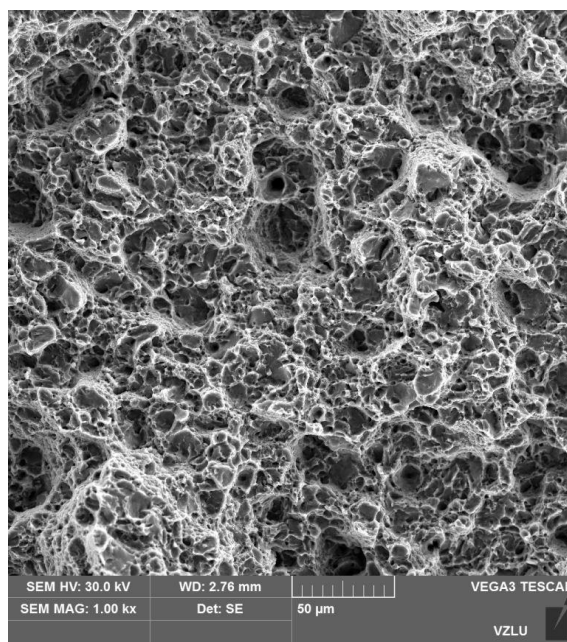
Obr. 3a: Zkušební zařízení k testování vodíkové křehkosti dle ASTM F 519



Obr. 3b: Zkušební vzorky s definovaným zářezem



Obr. 4a: Lomová plocha zkušebního vzorku mořeného v 15% HCl bez přídavku inhibitoru



Obr. 4b: Lomová plocha zkušebního vzorku mořeného v 15% HCl s přídavkem inhibitoru I

Tato práce byla vytvořena v rámci řešení projektu TA03010844 s finanční podporou TA ČR.

# HODNOCENÍ KOROZNÍHO NAPADENÍ HOMOGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE AUSTENITICKÉ TRUBKY A PŘÍRUBY

## CORROSION ATTACK EVALUATION OF HOMOGENEOUS WELD JOINT OF AUSTENITIC TUBE AND FLANGE

Dana Tonarová, Petr Brabec a Jaroslav Burda

ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

V současné době je často řešeným problémem korozní napadení heterogenních svarových spojů, nicméně korozní napadení se objevuje i na homogenních svarových spojkách. V předkládaném příspěvku je popsáno hodnocení korozního napadení austenitické příruby svařené s trubicí. U svarového kovu byla patrná koroze materiálu do třetiny tloušťky trubky a v základním materiálu austenitické trubky byla pozorována podpovrchová koroze.

### Abstract

The problem of heterogeneous weld joints corrosion attack is often solved, but corrosion attack also occurs on homogeneous weld joints. The paper describes the evaluation of corrosion attack of austenitic flange welded with a tube. In the weld metal, material corrosion was visible to one third of the thickness of the tube and subsurface corrosion was observed in the base material of the austenitic tube.

### Úvod

Do akreditované laboratoře oddělení Podpora provozu energetických zařízení v ÚJV byla dodána austenitická příruba pro hodnocení detekované vady na vnitřním povrchu svarového spoje příruby a trubky, který byl korozně napaden. Provozní parametry média v potrubí byly: tlak do 0,6 MPa, teplota do 33 °C, obsah chloridů do 90 mg/l. Hodnocený vzorek se skládá ze základního materiálu trubky (ZM1) a základního materiálu příruby (ZM2), spojených svarovým kovem (SK). Na vnější straně trubky byly vyznačeny informace o použitém materiálu trubky, a to 1.4571. Rozměry trubky byly Ø267 x 7 mm (vnější průměr x tloušťka stěny).

### Metodika

Chemické složení ZM jednotlivých částí svarového spoje bylo stanoveno metodou optické emisní spektrometrie (OES). Měření bylo provedeno mobilním optickým emisním spektrometrem ARC-MET8000 MobileLab SP (výrobce Oxford Instruments).

Mikrostruktura a mikrotvrdomost materiálů byly hodnoceny pomocí světelného mikroskopu Nikon Epiphot 300 a mikrotvrdoměru MHT Anton Paar 4 (Vickersova metoda, použité zatížení 100 g a doba zatížení 10 s). Vzorky byly dále hodnoceny skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) TESCAN VEGA TS 5130 XM s EDS a WDS detektorem.

### Výsledky a diskuse

#### Chemické složení materiálů

Chemické složení základních materiálů příruby a trubky je uvedeno v tabulce 1. Chemické složení materiálu potrubí odpovídá materiálu 1.4571 (podle ČSN materiál 17348). Co se týče materiálu příruby, tak se jedná buď o materiál stejné značky jako materiál trubky (ale různé tavby) anebo o materiál velmi podobného složení. Rozdíly složení obou materiálů se projevují především v obsahu Cr (rozdíl 1,5 %), menší rozdíl je patrný u Ni (rozdíl 0,7 %), Ti (rozdíl 0,1 %) a C (rozdíl 0,03 %). Po započtení rozšířené nejistoty je u materiálu příruby hodnota Ni mírně pod povolenou hranici materiálu 1.4571. Zadavatelem bylo určeno několik značek materiálů, pravděpodobně se jednalo o materiály 17246 nebo 17347.

## Hodnocení vnitřního povrchu

Na celém vnitřním povrchu svarového spoje příruby a trubky byly četné výrobní vady SK [1]. Podle normy ČSN EN ISO 6520-1 [2] obsahoval svarový spoj vady č. 5062 (přetečení kořenové vrstvy), č. 504 (nadměrný průvar), č. 513 a 514 (nepravidelná šířka a povrch). Dále na rozhraní ZM1-SK i ZM2-SK byly na několika místech zřetelné vady č. 5013 (vruby v kořeni). V okolí hodnocené vady (obr. 1) byla na vnitřním povrchu zřetelná oranžová korozní vrstva a u ústí vady zelená korozní vrstva. Podle semikvantitativní analýzy ze SEM, obsahuje zelená korozní vrstva zvýšené množství Cl a S (0,3 hm. % Cl a 0,6 hm. % S).

## Hodnocení příčných řezů svarovým spojem

Hodnocená provozní vada na příčném řezu (řez B2, obr. 2) pravděpodobně iniciovala na vnitřním povrchu ve vrubu v kořeni svaru a procházela SK až k rozhraní ZM1-SK do hloubky 2,5 mm. Korozní napadení nepokračovalo po rozhraní směrem ke koruně SK, ale bylo zřetelné na rozhraní ZM1 a zbytku SK. V žádném hodnoceném příčném řezu nebylo u rozhraní ZM1-SK korozní napadení spojené s vnitřním povrchem.

Dále je v ZM1 zřetelná podpovrchová koroze. Tato koroze je pozorovatelná do hloubky max. 1,7 mm a v hodnocených řezech není spojená s vnitřním povrchem. Po naleptání je patrné, že korozní napadení nejde po hranicích zrn, ale napadá celá zrna. Na povrchu dutin je dle dokumentace SEM patrné selektivní rozpouštění matrice. Korozní důlky byly stále aktivní, na jejich povrchu není patrná vrstva korozních produktů.

Na obvodovém řezu přibližně 15 mm od SK (řez B3, obr. 2) pokračuje podpovrchová koroze ZM1. Charakter napadení je obdobný jak na řezu B2, obvodová délka podpovrchové koroze je přibližně 6 mm.

## Hodnocení mikrostruktury a mikrotvrdomosti

Hodnocení bylo provedeno ve dvou příčných řezech svarovým spojem pro porovnání mikrostruktury v místě bez vady (řez A) a v místě vady (řez B2), obr. 3. Tyto příčné řezy svarovým spojem odpovídají podélnému směru vzhledem k ose tváření trubky.

Mikrostruktura ZM1 i ZM2 je v obou příčných řezech austenitická s viditelnými dvojčatovými hranicemi zrn. Z obrazové dokumentace je zřejmé, že v ZM2 je velikost zrna větší než v ZM1. Po naleptání kyselinou šťavelovou jsou v obou příčných řezech zřetelné podélné útvary odpovídající  $\delta$ -feritu. Množství  $\delta$ -feritu je rozdílné. V ZM1 je množství  $\delta$ -feritu ~ 2,1 % a v ZM2 je 11,4 % (hodnoceno v obou příčných řezech). V ZM2 je patrné řádkovité uspořádání  $\delta$ -feritu, které je pod úhlem vzhledem k vnitřnímu povrchu vzorku.

Mikrostruktura SK je austenitická, převážně dendritická typu FA. Po naleptání jsou viditelné housenky po svařování.

Lokální mikroanalýzou bylo ověřeno chemické složení ZM1, ZM2 a SK na příčném řezu B2 v místě vady. Chemické složení zbytku materiálu u hodnocené vady odpovídá chemickému složení SK. SK obsahuje větší zastoupení některých prvků v porovnání se ZM1 (rozdíl o 1,2 hm. % Cr, 0,9 hm. % Mn, 0,7 hm. % Ni).

Měření mikrotvrdomosti MHV0,1 bylo provedeno na obou příčných řezech přes svarový spoj, viz tabulka 2. Z výsledků měření MHV0,1 není patrný výrazný rozdíl mikrotvrdomosti ZM1 a ZM2. Hodnoty mikrotvrdomosti SK jsou závislé na pokládání housenek. Je patrné, že v koruně svaru je mikrotvrdomost mírně nižší než v kořeni svaru.

Mezi vzorky A (bez vady) a B2 (s vadou) není patrný žádný rozdíl v mikrostruktuře ani v mikrotvrdomosti materiálů.

## Závěr

Hodnocená vada představuje korozní napadení materiálu, které bylo propojené s vnitřním povrchem ve SK. Na příčných řezech byla zřetelná podpovrchová koroze ZM trubky až do vzdálenosti 15 mm od SK. Tato podpovrchová koroze byla spojena s korozní dutinou na rozhraní ZM trubky a SK. Kvůli rozdílu chemického složení ZM trubky a SK dochází ke korozi ZM trubky vlivem vzniku elektrochemického článku.

Trubka s hodnoceným svarovým spojem byla provozovaná v prostředí se zvýšeným množstvím chloridů, až desítky ppm. Na iniciačních místech, jako jsou např. vruby ve SK, může docházet k vysoké lokální koncentraci chloridů. I při nízké teplotě může docházet ke korozi austenitu v aktivním stavu, v místech s vysokou koncentrací chloridů a stagnujícím korozním prostředím nelze vyloučit ani iniciaci důlkové koroze. Další možností je mikrobiální koroze, která byla řešena ÚJV v roce 2010 [3] na stejném typu materiálu.

Pro eliminaci těchto korozních napadení je doporučována výměna austenitického materiálu za jiný materiál (např. plast nebo uhlíkovou ocel, u které je korozní napadení predikovatelné).

## Literatura

- [1] Tonarová, D., Brabec, P., Burda, J. (2017): *Hodnocení korozního napadení příruby u výměníku chlazení 4TG12W01, technická zpráva ÚJV-DITI 2302/521.*
- [2] ČSN EN ISO 6520-1 (2008): *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování.* Praha: Český normalizační institut.
- [3] Postler, M., Keilová, E., Kárník, D., Dotřel, J. (2010): *Hodnocení korozního připojovacího potrubí TVD, technická zpráva DITI 2302/1.*

## Tabulky a obrázky

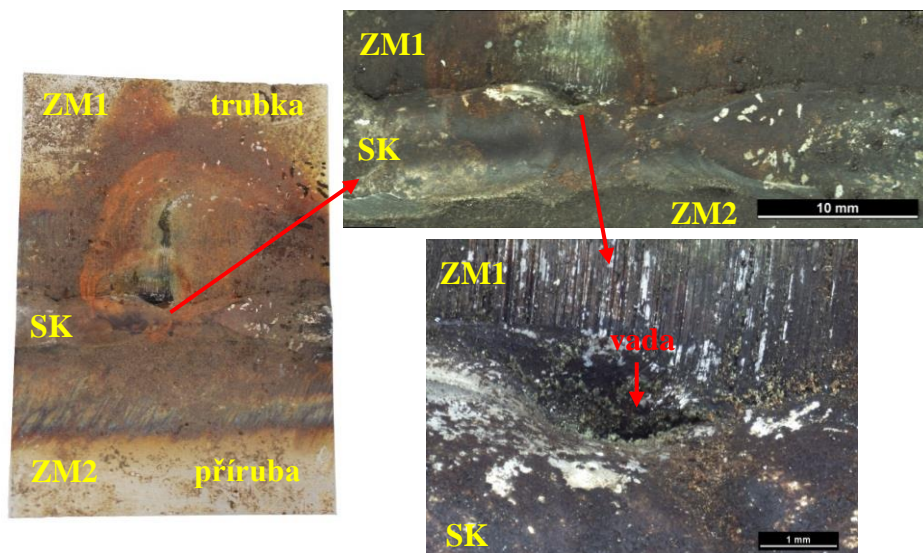
Tabulka 1: Chemické složení základního materiálu trubky (ZM1) a příruby (ZM2)

ZM1	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	W	Al	P	S
hm %	0,01	0,37	0,72	18,2	10,4	0,44	1,91	0,33	0,096	0,01	0,020	0,028	0,011
± U	0,03	0,09	0,20	1,0	0,8	0,04	0,10	0,03	0,011	0,04	0,008	0,002	0,007
ZM2	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	W	Al	P	S
hm. %	0,04	0,43	0,74	16,69	9,7	0,47	2,01	0,226	0,089	0,01	0,020	0,029	0,012
± U	0,04	0,06	0,10	1,30	0,6	0,03	0,07	0,025	0,006	0,03	0,008	0,002	0,006

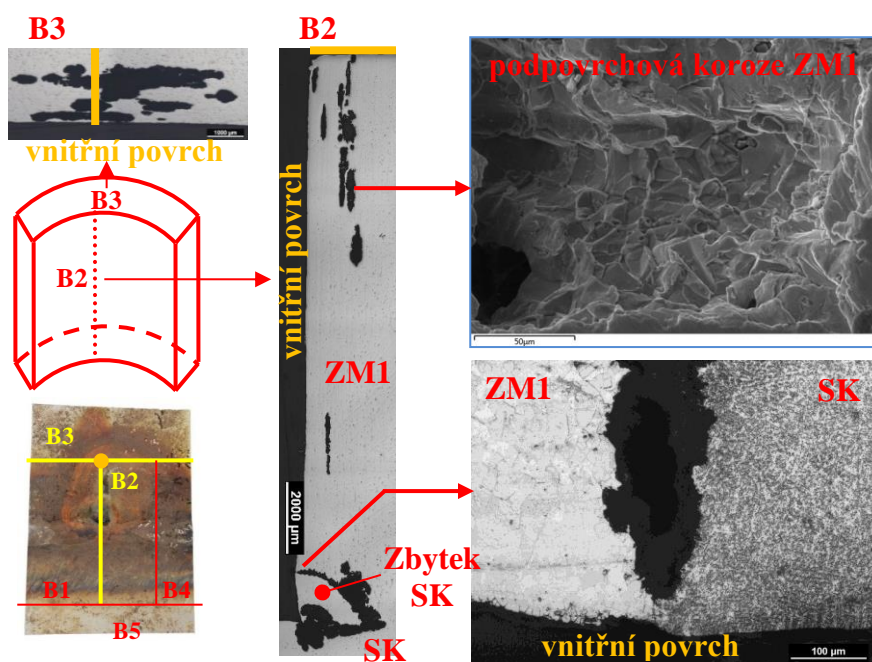
Tabulka 2: Shrnutí měření mikrotvrdomosti přes svarový spoj (ukázka profilu v místě kořene SK v řezu B2)

Umístění	Střední hodnota MHV0,1 [-]
SK koruna	174,9 ± 6,7
SK kořen	187,9 ± 7,2
ZM1	171,9 ± 8,1
TOZ1	148,8 ± 7,6
ZM2	171,3 ± 13,6
TOZ2	167,4 ± 13,9

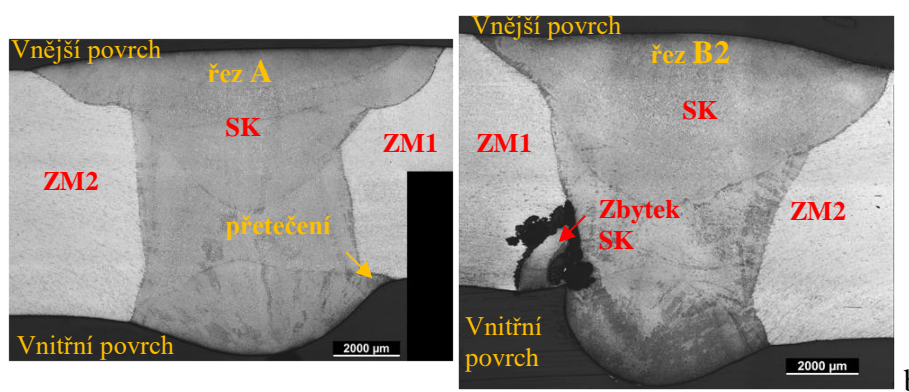




Obr. 1: Vnitřní povrch svarového spoje v místě vady; detail v místě vady



Obr. 2: Dokumentace korozního napadení materiálu na řezech B2 a B3



Obr. 3: Makrostruktura příčných řezů svarovým spojem: a) v místě bez vady, b) v místě s vadou

# METALOGRAFICKÉ OVERENIE A MERANIE DISTRIBÚCIE BÓRU V OCELI ATABOR A V OBLASTI JEJ ZVAROVÝCH SPOJOV

## METALLOGRAPHIC VERIFICATION AND MEASUREMENT OF BORON DISTRIBUTION IN ATABOR STEEL AND ITS WELD JOINTS

Marek Adamech, Martin Březina, Jana Petzová a Miloš Bařák

VUJE, a.s., Okružná 5, 918 64 Trnava, Slovakia

### Abstrakt

Vyhoreté jadrové palivo z elektrárni typu VVER-440 sa na Slovensku skladuje v bazénoch Medziskladu Vyhoretého Paliva (MSVP) v špeciálnych kompaktných zásobníkoch typu KZ-48. Tie sú vyrobené z korozivzdornej chróm-niklovej ocele typu 304 so zaručeným obsahom bóru min. 1.10 hm. %, ktorý slúži ako absorbér tepelných neutrónov. Požadovaný obsah bóru v oceli však môže potenciálne klesnúť v dôsledku jeho fluktuácie v základnom materiáli počas samotnej výroby, v procese zvarovania absorpčných puzdier alebo absorpciou tepelných neutrónov. Pomocou metód svetelnej, riadkovej a transmisnej mikroskopie, ako aj za použitia spektroskopických metód bolo cieľom overiť distribúciu bóru vo vzorkách z vybraných tavieb plechov, vrátane aplikácie zvarových spojov metódami použitými pri samotnej výrobe absorpčných puzdier pre kompaktný zásobník KZ-48.

### Abstract

Spent nuclear fuel from a VVER-440-type power plant is stored in Slovakia in the Interim Spent Fuel Storage (ISFS) pools in special KZ-48 compact racks. They are made of chromium-nickel stainless steel with guaranteed boron content min. 1.10 wt. %, which serves as a thermal neutron absorber. However, the required boron content in steel may potentially decrease due to its fluctuation in the base material during production itself, in the process of welding of absorbent cases or by absorption of thermal neutrons. The aim of the study is to verify the distribution of boron content in selected steel samples, including the application of experimental welding joints by using the same welding methods used for the manufacture of the absorbent cases for the KZ-48 compact racks. Methods of optical (OM), scanning (SEM) and transmission microscopy (TEM) as well as spectroscopic methods (ICP-MS, GDOES) were used.

### Úvod

V súčasnej dobe je vyhorené palivo z elektrárni typu VVER-440 na Slovensku skladované v MSVP, ktorý je umiestnený v lokalite Jaslovské Bohunice. Palivo sa skladuje „mokrým spôsobom“, čo znamená, že palivové články vyhoreného paliva sú umiestnené v bazénoch pod vodnou hladinou v špeciálnych zásobníkoch. Z potreby predĺženia doby skladovania paliva a navýšenia skladovacej kapacity bolo navrhnuté riešenie v podobe vzájomného priblíženie palivových článkov. Z hľadiska jadrovej bezpečnosti je potrebné, aby pri zmenšení vzdialenosti nedošlo k vzniku kritického súboru a rozbehu reťazovej štiepnej reakcie. Z tohto dôvodu musel byť do navrhovaných kompaktných zásobníkov použitý materiál s absorbérom tepelných neutrónov. Ako konštrukčne najjednoduchšie riešenie sa ukázalo použitie nehrdzavejúcej ocele so zvýšeným, definovaným obsahom prírodného bóru, čo zaručilo dosiahnutie požadovanej podkritickosti vyhoreného paliva v bazénoch MSVP. Absorpčné puzdra kompaktných zásobníkov sú vyrábané zo špeciálnej bórovej ocele označovanej napr. obchodným názvom ATABOR. Obsah bóru v tejto oceli bol prísne kontrolovaný, aby nedošlo k použitiu plechov s nižším obsahom, ako je predpísaná minimálna hodnota (tabuľka 1).

Napriek tomu je potenciálne možné, že pri absorpcii tepelných neutrónov môže dôjsť v dôsledku jadrových reakcií k postupnému znižovaniu obsahu bóru v uvedených oceliach. Ďalšou možnosťou poklesu obsahu bóru je proces zvarovania absorpčných puzdier. V neposlednom rade



môže dôjsť k fluktuáciám obsahu bóru v základnom materiáli počas jeho výroby. Všetky tieto úvahy viedli k riešeniu experimentálnej úlohy s cieľom overiť distribúciu  $^{10}\text{B}$  v zvarovom spoji absorpčných puzdier [1, 2].

## Materiál a metódy

Analýzou archívnej sprievodnej technickej dokumentácie bolo na základe chemického zloženia a spôsobu výroby (výrobca, použitá technológia zvarovania) vybratých na analýzu 10 tavičiek. Výroba skúšobných vzoriek pozostávala z aplikácie experimentálnych zvarových spojov pomocou plazmy, laseru a elektrónového lúča, teda metód použitých aj pri originálnej výrobe. Analýza bola doplnená o simuláciu neštandardných stavov - stehovanie a oprava zvaru, ako aj o originálny zvarový spoj vyrobený pomocou plazmy. Skúšobne vzorky boli podrobené dôkladnej materiálovej analýze v miestach základného materiálu (ZM), experimentálneho zvarového kovu (ZK), teplom ovplyvnenej oblasti (TOO), rovnako ako v miestach simulovaných neštandardných stavov.

Výsledky boli získané použitím svetelnej, riadkovej (REM/EDX) a transmisnej mikroskopie (TEM), doplnené o spektroskopické metódy (ICP-MS a GDOES). Pozorovaniu na svetelnom a riadkovačom mikroskope predchádzala dôsledná metalografická príprava. Pre pozorovanie v TEM boli pripravené dvojstupňové extrakčné repliky a tenké fólie.

## Výsledky a diskusia

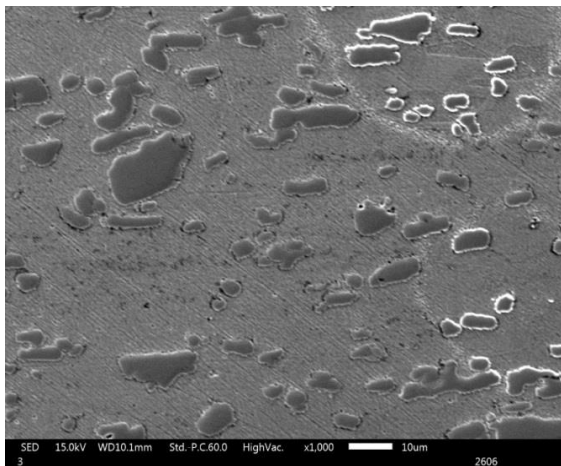
Mikroštruktúra základného materiálu má polyedrickú morfológiu (obr. 1) a matrica je tvorená austenitom. Hranice zrna sú čisté bez prítomnosti sekundárne vylúčených fáz. V austenitických zrnách možno pozorovať aj žihacie dvojčatá, ktorých prítomnosť je typická pre zliatiny s kubickou plošne-centrovanou kryštálovou mriežkou. V matrici boli pozorované masívne častice nepravidelného tvaru (identifikované na základe elektrónovej difrakcie ako boridy  $\text{M}_2\text{B}$  a  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  (obr. 1 a obr. 2)), ktorých veľkosť je v intervale 5 až 20  $\mu\text{m}$ . Pomocou metódy ICP-MS bol stanovený obsah bóru vo vzorke základného materiálu na 1,23 % a pomer  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  : 19,84/80,16, čo odpovedá prírodnému bóru. Na obr. 3 je zobrazený hĺbkový profil bóru meraný vo vzorke ZM.

Mikroštruktúra ZK vo všetkých vzorkách má dendritickú morfológiu (obr. 4 a obr. 5), pričom dendrity sú tvorené austenitom a v medzidendritickom priestore je vylúčené eutektikum. Ich vzájomný podiel sa mení v závislosti od analyzovanej vzorky a použitej metódy zvarovania. Na základe získaných elektrónových difrakčných spektier je možné určiť, že eutektikum je tvorené zmesou fáz  $\delta$ -feritu, karboridu  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ , a boridov  $\text{M}_2\text{B}$ , pričom možno predpokladať, že môže obsahovať aj austenit a malý podiel  $\text{M}_3\text{B}$ . Pomocou metódy ICP-MS bol stanovený obsah bóru vo vzorke zvarového kovu na 1,28 % a pomer  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  : 19,93/80,07 v súlade s izotopovým rozložením prírodného bóru.

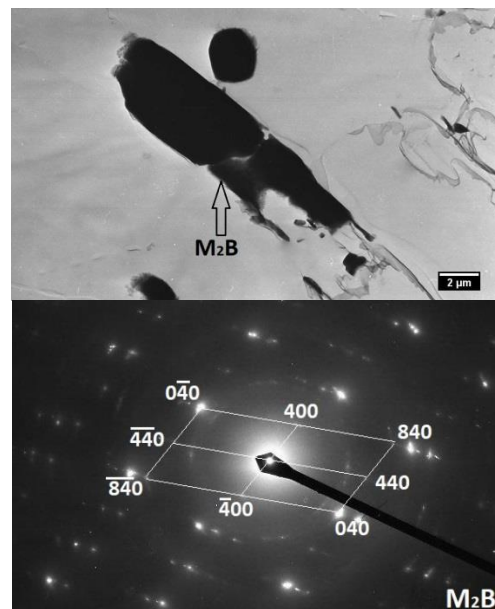
V prípade zvarových spojov zvarovaných plazmou sa v TOO v blízkosti hranice natavenia pozorovali štruktúrne zložky eutektikum a matrica a iba ojedinele výskyt boridov. V závislosti od použitej technológie zvarovania sa mení aj plošné zastúpenie mikroštruktúrnych zložiek. V TOO nastalo čiastočne rozpúšťanie masívnych častíc nepravidelného tvaru (obr. 6) a na hranici stavenia sa zasa pozoroval zvýšený podiel eutektika. V prípade zvarovania s vysokou rýchlosťou ohrevu, ako laser a elektrónový lúč sa v mikroštruktúre TOO nachádzajú čiastočne rozpustené a nerozpustené boridy. Hranice austenitických zŕn, ktoré susedili so ZK, boli naleptané intenzívnejšie a TEM analýza potvrdila precipitáciu boridu  $\text{M}_2\text{B}$  prípadne  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  (obr. 7). V procese zvarovania sa v TOO čiastočne rozpúšťali masívne častice a pri ochladzovaní ZS sa realizovala opätovná precipitácia sekundárnych fáz ( $\text{M}_2\text{B}$ ,  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  prípadne  $\text{M}_3\text{B}$ ).

## Závery

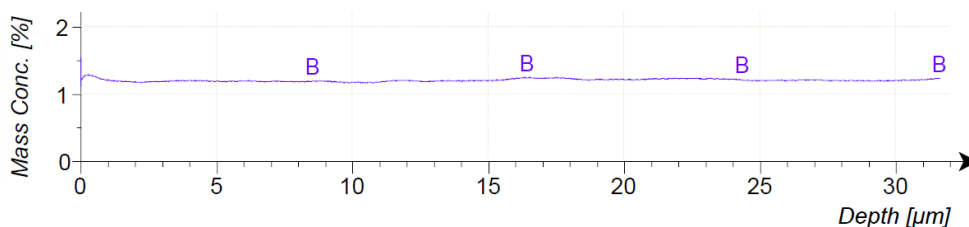
- Pozorovania mikroštruktúry vzoriek v REM a TEM preukázali maticu ZM tvorenú austenitom a prítomnosť masívnych častíc boridov nepravidelného tvaru. Dendrity v ZK sú tvorené austenitom a v medzidendritickom priestore je vylúčené eutektikum (zmes  $\delta$ -feritu a boridov). V TOO nastalo čiastočne rozpúšťanie masívnych častíc nepravidelného tvaru a na hranici stavenia sa zasa pozoroval zvýšený podiel eutektika. Boli identifikované častice  $M_2B$ ,  $M_{23}(C,B)_6$  prípadne  $M_3B$ .
- Na základe uskutočnených meraní GDOES je možné konštatovať, že hmotnostný podiel bóru v rámci analyzovanej hĺbky profilu v ZM neklesá pod stanovenú hodnotu 1,1 hm. %.
- Výsledky hmotnostnej spektrometrie (ICP-MS) potvrdili vyhovujúci obsah bóru v ZM a ZK, ako aj zachovaný prírodný pomer izotopov  $^{10}B/^{11}B : 20/80$ .
- V budúcnosti by bolo vhodné zamerať sa na analýzu koróznych vlastností bórových ocelí (a ich ZS) a prípadného nepriaznivého vplyvu bóru na medzikryštálovú koróziu.



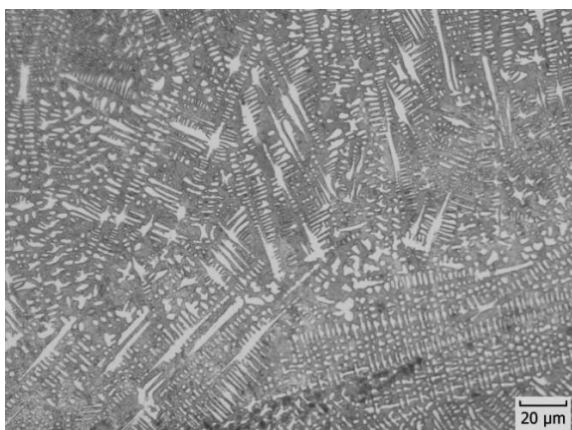
Obr. 1: Mikroštruktúra ZM s polyedrickou morfológiou (REM)



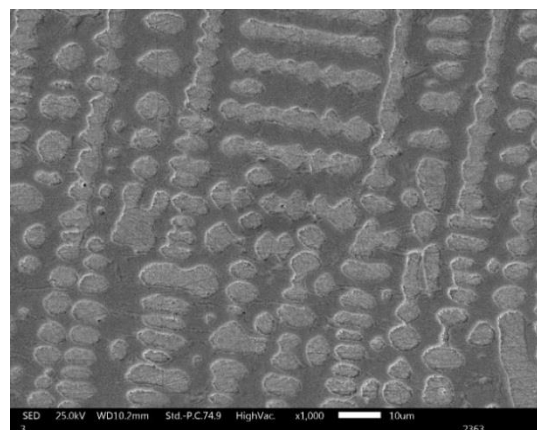
Obr. 2: Mikroštruktúra základného materiálu (TEM), častice identifikované pomocou elektrónovej difrakcie ako borid  $M_2B$



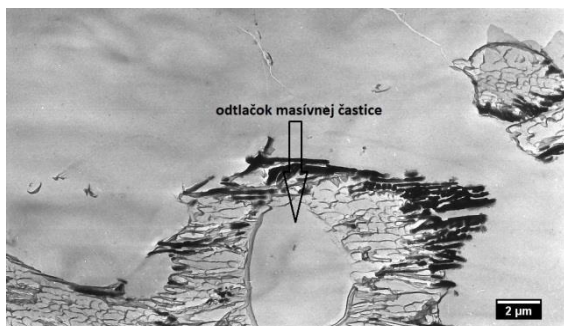
Obr. 3: Hĺbkový profil bóru vo vzorke ZM (GDOES)



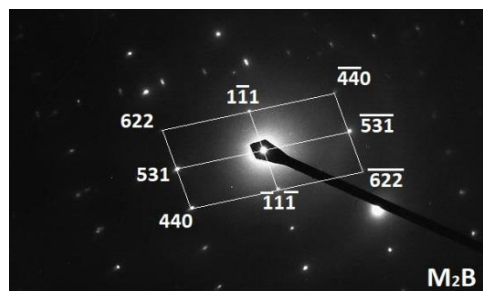
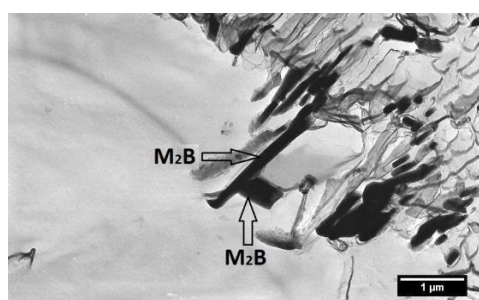
Obr. 4: Mikroštruktúra ZK (svetelná mikroskopia)



Obr. 5 Mikroštruktúra ZK – detail (REM)



Obr. 6: TOO – v blízkosti masívnej častice zvýšená hustota častíc s rôznou morfológiou (TEM)



Obr. 7: Častice identifikované pomocou elektrónovej difrakcie ako borid  $M_2B$

Tabuľka 1: Požadované chemické zloženie bórovej ocele

Oceľ	Obsah prvkov [hmot. %]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Co	B
ATABOR	max. 0,03	max. 2,0	max. 0,75	max. 0,045	max. 0,03	18,0 ÷ 20,0	12, ÷ 15,0	max. 0,10	max. 0,20	1,10 ÷ 1,30

## Literatúra

- [1] (1996): *Dokumentácia pre schvaľovací proces kompaktného zásobníka (KZ), technická správa, MSVP-VYZ TZ 01-96*. Jaslovské Bohunice.
- [2] (1996): *Dokumentácia pre schvaľovací proces kompaktného zásobníka (KZ), bezpečnostná dokumentácia, MSVP-VYZ TZ 01596*. Jaslovské Bohunice.

# VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE PRO DIAGNOSTIKU CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ PAROVODNÍCH SYSTÉMŮ

## ACOUSTIC EMISSION AS A METHOD FOR DIAGNOSTICS OF CREEP DAMAGE OF STEAM PIPING SYSTEMS

Marie Svobodová<sup>a)</sup>, Tomáš Chmela<sup>a)</sup>, Josef Čmakal<sup>a)</sup>, Tomáš Slunéčko<sup>b)</sup> a Václav Koula<sup>b)</sup>

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

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

### Abstrakt

Doba provozu většiny energetických zařízení a podniků chemického průmyslu v ČR je významným důvodem pro vývoj diagnostických a provozně monitorovacích systémů, které by výrazně přispěly ke snížení rizika možné havárie vysokotlakých potrubních systémů provozovaných při vysoké teplotě. A právě diagnostika s využitím akustické emise (AE) je pro danou oblast perspektivní metodou nedestruktivního testování, neboť, na rozdíl od běžných ultrazvukových diagnostických metod využívaných k lokální diagnostice, je využitelná pro dlouhodobé plošné provozní monitorování stavu potrubí a umožňuje z více míst současně snímat signál AE, ten dálkově přenášet a v diagnostickém systému zaznamenávat a zpracovávat data v reálném čase. Tento příspěvek shrnuje dosavadní laboratorní výsledky odezvy AE na průběh creepového procesu (nukleaci a propagaci creepové trhliny) u parovodní oceli 15 128.

### Abstract

The operating time of most energy and chemical plants in the Czech Republic is an important reason for the development of diagnostic and operational monitoring systems that would greatly contribute to reducing the risk of a high-temperature high-pressure pipeline accident. And acoustic emission (AE) diagnostics belongs to these perspective non-destructive testing that is, unlike to conventional ultrasound diagnostic methods used for local diagnostics, usable for long-term field monitoring of the pipeline condition. Moreover, acoustic emission diagnostics allows to simultaneously capture the AE signal from multiple locations, remotely transmit and record real-time data in the diagnostic system and to analyze them. This paper summarizes the laboratory results of the AE response to the creep process (nucleation and propagation of the creep crack) taking part in steam pipeline steel 15 128.

### Úvod

Od roku 2016 je ve spolupráci čtyř odborných pracovišť: Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech. DAKEL – Středisko technické diagnostiky (dále jen DAKEL), UJP PRAHA a.s., Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i. a Laboratoř akustické emise FSI VUT v Brně, řešen výzkumný projekt č. FV10645 programu MPO ČR - TRIO s názvem „Analyzátor kontinuální akustické emise pro diagnostiku erozně korozního a creepového poškození potrubních systémů“. Jeho 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 pro diagnostiku šíření trhlin, vznikajících v důsledku creepového poškození.

Hlavním úkolem pracoviště UJP PRAHA a.s. v rámci tohoto projektu je nalézt spojitosti mezi nukleací (tvorbou) a propagací (šíření) trhlin, které nastávají v materiálu při creepu, a odezvou jeho AE během tohoto procesu. K tomuto účelu jsou v laboratořích UJP PRAHA a.s. prováděny jednoosé tahové creepové zkoušky několika parovodních materiálů s různou předchozí expozicí (např. 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). V praxi se však nelze vyhnout šumům, ve kterých se emisní události spojené s nukleací a propagací creepové trhliny ztrácí. Proto jsou během creepových zkoušek souběžně klasifikovány jednotlivé zdroje šumů s cílem se jim v následných creepových zkouškách (a výhledově i v provozních podmínkách) zcela vyhnout nebo upravit parametry snímání či post-hodnocení signálu AE tak, aby byly tyto šумы co nejvíce eliminovány.

V následujícím textu jsou popsány dosavadní laboratorní výsledky odezvy AE na průběh creepového procesu (nukleaci a propagaci creepové trhliny) u parovodní oceli 15 128.

### **Experimentální materiál**

Zkoušený materiál pochází z vysokotlakého parovodu (z oceli ČSN 15 128.9 jmenovitých rozměrů OD 324 x 48 mm) kotle K6 v Elektrárně Počerady z kolena OH17. Koleno bylo po 240 066 pracovních hodinách při teplotě 540 °C a tlaku 17,46 MPa vyřezáno, protože se v jeho tažené části objevily creepové trhliny. Těsně pod vnějším povrchem tažené části s trhlinami byly tangenciálně odebrány vzorky pro creepovou zkoušku se záznamem AE. Vzorky mají tvar krátkých poměrných závitových tahových tyčí s průměrem 6 mm a závitem M10 s prodloužením závitové hlavy na jedné straně pro přivaření vlnovodu, který zprostředkovává přenos akustického signálu.

### **Laboratorní creepové zkoušky**

Jednoosé tahové creepové zkoušky jsou prováděny na tří-pozicovém stroji Zst 2/3, vyrobeném firmou VEB WERKSTOFF PRUFMASCHINEN LEIPZIG. Podmínky dosud ukončených zkoušek shrnuje tabulka 1 ( $\varnothing$  je průměr zkušební tyče,  $F$  je zatěžovací síla,  $\sigma$  je napětí vztahované k průměru  $\varnothing$ ,  $T$  je teplota zkoušky,  $t_r$  je doba do lomu,  $A_5(\epsilon)$  je deformace při lomu a  $Z$  je kontrakce). Teplota v peci je kontrolována třemi kalibrovanými termočlánky typu K a zaznamenávána pomocí modulu ADAM (výrobce Advantech) do počítače. Creepové prodloužení je kontinuálně snímáno pomocí citlivého inkrementálního rotačního čidla (zapojeného přes kladku) a zapisováno do miniaturního počítače Raspberry Pi (snímá se čas, úhel pootočení měřící kladky a z nich přepočtené prodloužení vzorku).

Výsledky nemají z hlediska stanovení creepového chování příliš vysokou vypovídající hodnotu, ale pro potřeby nalezení spojitosti mezi procesem creepu a odezvou jeho AE jsou zcela dostačující.

### **Snímání signálu AE**

Záznam akustické emise byl realizován systémem DAKEL-XEDO (v současnosti je používán systém DAKEL-ZEDO, nejnovější produkt řešitele projektu DAKEL). Na začátku zkoušky byl navíc paralelně proveden záznam AE systémem DAKEL-IPL s konstantní vzorkovací frekvencí 2 MHz (v případě vzorku C16 byly také zaznamenávány 10 minutové úseky periodicky každých 12 hodin po celou dobu zkoušky).

Aktivita signálu AE ze vzorku je sledována přes vlnovod magnetickým snímačem MDK13 po celou dobu creepové zkoušky. Signál snímače, který obsahuje integrovaný předzesilovač, je snímán při zesílení 20 dB a 40 dB se vzorkovací frekvencí 2 MHz. Frekvenční rozsah použité sondy je 500 kHz. Základem hodnocení parametrů AE je analýza celkového šumového pozadí. Pro tento účel se v systému XEDO během creepové zkoušky sledují počty překmitů (cnt) amplitudy přes dvě nastavitelné prahové úrovně (c1 204 mV, c2 604 mV), a střední efektivní hodnota signálu RMS (Root Mean Square). Systém dále hodnotí počet emisních událostí (EU), které převyšují běžné šumové pozadí, a tvarové parametry těchto událostí.



## Výsledky creepových zkoušek

Doba do lomu creepovaných vzorků je závislá na přesné lokalitě odběru vzorků pod creepovými trhlinami v tažené části parovodního kolene. Vzorek C14, s nejkratší dobou do lomu, v sobě obsahoval několik creepových trhlin ještě před začátkem laboratorní creepové zkoušky, viz obr. 1. Naopak výchozí stupeň creepového poškození vzorku C16, s nejdelší dobou do lomu, odpovídal pouze ojedinělým kavitám. Každopádně ve všech případech došlo v průběhu laboratorní creepové zkoušky k rozvoji creepového poškození a k tvorbě magistralní creepové trhliny.

V souvislosti s dobou do lomu je patrný rozdíl i v dosažené celkové deformaci. Kontinuální záznam creepové deformace (creepová křivka) ve všech případech však odpovídal očekávanému průběhu s třemi stádii, viz ukázka na obr. 2, ačkoliv přesná identifikace přechodu z jednoho stádia do druhého není vždy jednoduchá, viz obr. 3.

## Výsledky analýzy AE

V průběhu creepových zkoušek byly detekovány jednotlivé EU a hodnoty RMS. Jejich vývoj sleduje rychlost creepové deformace, viz obr. 2 a obr. 3: v primárním stádiu vykazují RMS vyšší hodnoty a dochází k vyššímu počtu EU. Při přechodu do sekundárního stádia ustálené creepové deformace (minimální rychlost creepu) hodnoty RMS postupně klesají až k minimálním pouze s občasným výkyvem k vyšším hodnotám. Také nárůst počtu EU se výrazně sníží a zůstává konstantní až do terciárního stádia, kdy dochází k rapidnímu nárůstu počtu EU. Také hodnoty RMS v blízkosti doby do lomu extrémně narůstají a dosahují až trojnásobku hodnot v primárním stádiu.

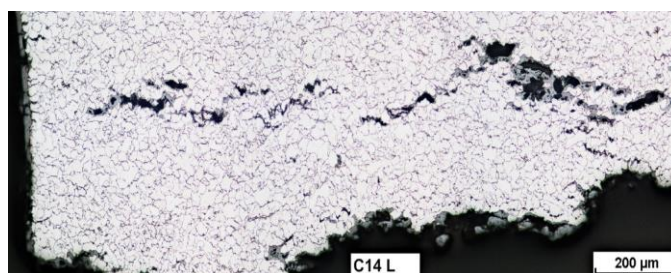
Kromě grafického hodnocení záznamů AE byly všechny EU převedeny do frekvenčních spekter pomocí Fourierovy transformace a tato frekvenční spektra byla dále zpracována do časových přehledů, viz obr. 4, v nichž každý bod grafu náleží jedné EU v čase, kdy k této události došlo. EU je zde interpretována frekvencí, při níž byla dosažena maximální amplituda frekvenčního spektra. V blízkosti doby do lomu lze pozorovat několik frekvenčních hladin, zatímco v průběhu celé zkoušky je frekvence naprosté většiny EU cca 200 kHz.

## Závěr

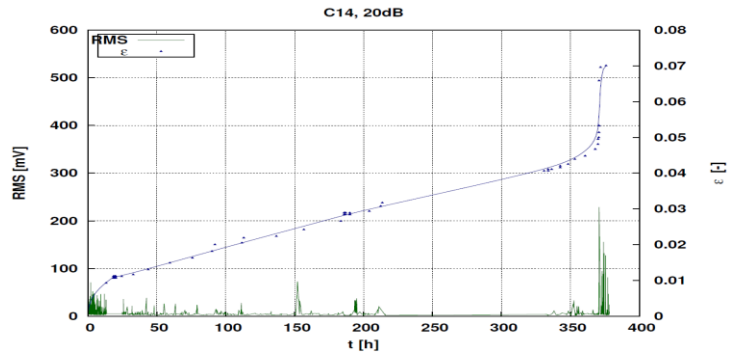
Z dosud dokončených laboratorních testů vyplývá, že vývoj počtu EU koresponduje s nárůstem creepové rychlosti při přechodu do terciárního stádia creepu. Další práce budou zaměřeny na identifikaci zdrojů EU dle frekvenčních spekter, tj. vyloučení těch frekvencí, které odpovídají šumům a nikoli AE odezvě creepového děje.

Tabulka 1: Podmínky a výsledky ukončených creepových zkoušek

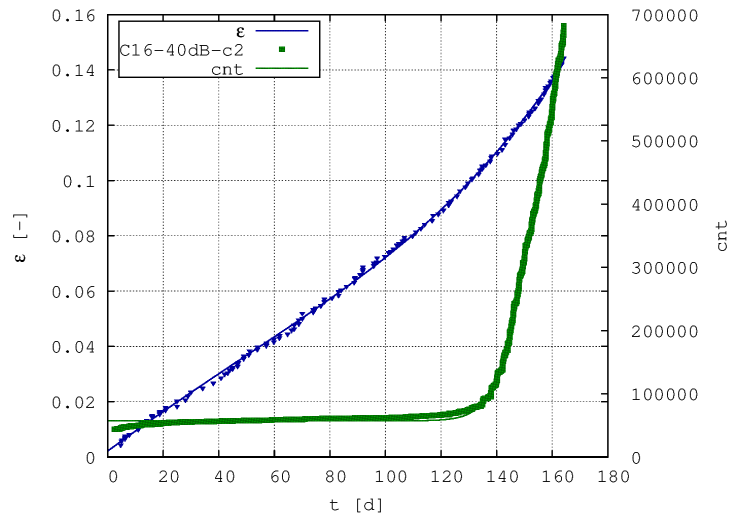
Vzorek	$\varnothing$ [mm]	F [kp]	$\sigma$ [MPa]	T [°C]	$t_r$ [h]	A5( $\epsilon$ ) [%]	Z [%]
C14	5,99	280	97,5	545	370,8	6,1	10,6
C15	5,96	260	91,4	545	1027	7,8	9,2
C16	5,99	260	90,5	540	4143	18,4	24,4



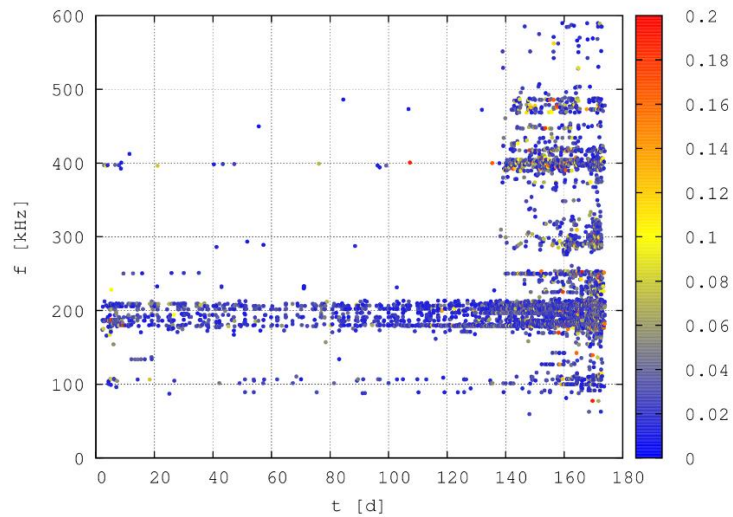
Obr. 1: Mikrostruktura vzorku C14 v blízkosti lomu po creepové zkoušce. Uvnitř materiálu jsou patrné zoxidované creepové trhlinky z předchozí provozní expozice.



Obr. 2: Vývoj RMS a creepové deformace  $\epsilon$  při zesílení 20 dB – vzorek C14



Obr. 3: Vývoj počtu EU v porovnání s creepovou deformací  $\epsilon$  při zesílení 40 dB – vzorek C16



Obr. 4: Časový přehled všech zaznamenaných EU z obr. 3. Barevná škála (normalizovaná) odpovídá úrovni dosažené maximální amplitudy.



# EVROPSKÉ PŘÍSTUPY K ŘÍZENÍ STÁRNUTÍ SKRYTÝCH POTRUBÍ

## EUROPEAN APPROACH TO LIFE TIME MANAGEMENT OF CONCEALED PIPEWORK

Martin Krondák

ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Husinec-Řež, 250 68; Martin.Krondak@ujv.cz

### Abstrakt

Na jaře v roce 2018 proběhlo první kolo TPR (Topical Peer Review) organizované ENSREG a WENRA. V rámci TPR participující země prezentovali své přístupy k řízení životnosti vybraných komponent a identifikovaly dobré praxe. Příspěvek popisuje společné rysy řízení životnosti nedostupných potrubí a též i specifické přístupy některých evropských zemí. Autor příspěvku se TPR účastnil jako člen expertní skupiny nominovaný ČR.

### Abstract

The first TPR (Topical Peer Review) organized by ENSREG and WENRA was performed in spring 2018. Participating countries presented their approaches to ageing management of chosen components and identified good practices. The proceeding describes common aspects of ageing management of concealed piping and some specific approaches of European countries. The author participated at TPR in a role of expert group nominated by CR.

### WENRA a ENSREG

WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) byla založena regulátory v roce 1999 za účelem sjednocení přístupu k jaderné bezpečnosti, který byl sice ve všech zemích založen na přístupu IAEA, nicméně vlastní implementace i hodnocení se v jednotlivých zemích lišily. Země jsou reprezentovány řediteli/předsedy jednotlivých národních regulátorů.

ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) je nezávislá expertní skupina založená v roce 2007 na základě návrhu Evropské komise prosazující jednotný evropský přístup tam, kde to povede ke zlepšení jaderné bezpečnosti. Jednotlivé země jsou reprezentovány seniorními pracovníky národních jaderných dozorů.

### Topical Peer Review

Evropská rada v roce 2014 na základě zkušenosti získané po havárii ve Fukushima doplnila směrnici o jaderné bezpečnosti z roku 2009 a zavedla evropský systém aktuálních vzájemných hodnocení organizovaných ENSREG, který začne v roce 2017 a opakuje se každých šest let. V červenci 2015 skupina ENSREG identifikovala na základě věkového profilu evropských elektráren jako téma pro první TPR „řízení stárnutí jaderných elektráren“.

V roce 2016 WENRA, respektive skupina RHWG, připravila technickou specifikaci, která definovala strukturu a obsah národních hodnotících zpráv. V roce 2017 jednotlivé země připravily národní hodnotící zprávy a proběhlo vlastní hodnocení a následně na jaře 2018 proběhlo peer review a Peer Review Workshop a v srpnu 2018 byla publikována finální zpráva z Workshopu.

Vlastní hodnocení se týkalo provozovaných reaktorů a reaktorů ve výstavbě a výzkumných reaktorů s tepelným výkonem nad 1 MW, nicméně některé země dobrovolně hodnotili i méně výkonné reaktory. V národní zprávě byly v jednotlivých kapitolách hodnoceny: celkové požadavky na PŘS a jejich implementaci, elektrické kabely, skrytá potrubí, tlaková nádoba reaktoru, calandria/tlakové trubky (CANDU), betonové struktury kontejnmentu a předpjaté betonové tlakové nádoby (AGR).

## **Skrytá potrubí**

Skryté potrubí (concealed pipework) je nový pojem definovaný v rámci TPR jako potrubí zakopané v zemi (buried pipework), zalité v betonu (embedded in concrete) a v zakrytých kanálech (in covered trenches). V prvotních verzích Technických specifikací Národních zpráv se hovořilo po podzemních a zakopaných potrubích (underground and buried piping) ve smyslu NSAC 202 L. Později došlo k posunu a finální rozsah pro TPR zahrnoval, tak jak tomu rozuměli jednotlivé země, jednak zakopaná potrubí ve smyslu iGALL (IAEA SRS 82 AMP125) i nedostupné potrubní úseky uvnitř budov (často průchody stěnou či potrubí zalité v betonu – angl. embedded pipework).

## **Degradační mechanismy**

V rámci řízení stárnutí nedostupných tras různé země kategorizují degradační mechanismy různým způsobem, což je matoucí, nicméně ve všech případech jsou aktivními degradačními mechanismy plošná koroze a důlková koroze. Dále pak záleží na konkrétním PŘS, zda jsou tyto dva hlavní mechanismy dále děleny dle povrchu, ze kterého jsou iniciovány (vnější a vnitřní) či dle příčiny korozního napadení (např. MIC). U systémů potrubí primárních okruhů pak bylo jako degradační mechanismus identifikováno ještě korozní praskání pod napětím.

Nápravná opatření: nejčastějšími nápravnými opatřeními proti působení degradačních mechanismů jsou opatření realizovaná při instalaci trasy, zejména aplikace ochranných bariér (např. barva, plastové či asfaltové pokrytí, výstelka betonem) či aplikace katodické ochrany.

## **Inspekce**

Všechny PŘS zahrnují alespoň nějaký rozsah inspekci. Techniky, jež jsou široce používané, umožňují monitorování plošné koroze. Jde například o vizuální inspekce vnějšího povrchu při výkopových pracích či vnitřního povrchu při údržbě, UTT, RT či ECT. Velmi často je stav inspektovaného dostupného úseku extrapolován na stav celého potrubí. Vzhledem k riziku poškození potrubí při výkopových pracích není vhodné potrubí vykopávat pouze kvůli inspekci, nicméně je žádoucí realizovat inspekce vždy, když je potrubí odhaleno z jiných důvodů (opportunistic inspection).

## **Dobrý výkon (good performance)**

Dobrý výkon je taková aktivita, jejíž provádění je považované za standard. V rámci TPR byly identifikovány: (i) rozsah skrytých potrubí zahrnutých do řízení životnosti zahrnuje taková potrubí, jež mají bezpečnostní funkci a dále ta potrubí jejichž selhání může ovlivnit systémy a komponenty mající bezpečnostní funkci, (ii) provádění oportunistických inspekci vždy, když je potrubí odhaleno z jiných důvodů, než je vlastní inspekce a je přístupné.

## **Dobrá praxe (good practice)**

Dobrá praxe je taková aktivita, jejíž provádění je považováno za nadstandard. Identifikovány byly: (i) inspekce průchodek bezpečnostních potrubí skrz betonové struktury by měly být součástí PŘS, pokud není demonstrováno, že není aktivní žádný degradační mechanismus, (ii) pravidelné monitorování stavu stavebních objektů je kromě poskytování informací o sesedání budov a zeminy použito též jako vstup proto AMP skrytých potrubí a (iii) pro hodnocení nových materiálů jsou sekce z těchto materiálů po určité době vyjmuty k destruktivnímu zkoušení pro ověření očekávaného stavu materiálu.

## **Závěry**

Ačkoli během TPR nebyly identifikovány zjevné nedostatky v jednotlivých PŘS, tak řada zemí konstatovala, že efektivnost relativně nových PŘS zatím nebyla prokázána a je třeba monitorovat jejich funkčnost.

# VÝVOJ PROCESU REGENERAČNÍHO ŽIHÁNÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER-440 PRO ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU

## DEVELOPMENT OF THERMAL ANNEALING PROCESS OF WWER-440 INTERNALS FOR PROVIDING A LONG-TERM OPERATION

Petra Petelová<sup>a)</sup>, Barbora Marešová<sup>a)</sup>, Ondřej Buršík<sup>a)</sup>, Radim Kopřiva<sup>a)</sup> a Aleš Materna<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> ÚJV Řež, a. s.

<sup>b)</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

### Abstrakt

Vnitřní části reaktorů jaderných elektráren jsou vystaveny nepříznivým vlivům provozních podmínek (vysokému tlaku a teplotám, neutronovému toku, koroznímu prostředí), které způsobují postupnou degradaci jejich mechanických vlastností. Regenerační žihání může být prostředkem pro obnovení původních vlastností materiálů vnitřních částí reaktorů a může tak přispět k zajištění dlouhodobého provozu reaktorů. Příspěvek pojednává o průběhu vývoje certifikované metodiky regeneračního žihání materiálů vnitřních částí reaktorů typu VVER-440 a představuje první výsledky týkající se žihání neozářených materiálů a jejich následného mechanického testování.

### Abstract

Reactor pressure vessel internals of nuclear power plants are exposed to severe operating conditions (high pressure and temperatures, neutron flux, corrosion environment), which cause gradual degradation of their mechanical properties. Thermal annealing can be one of the possible solutions to provide and re-establish initial mechanical properties of reactor pressure vessel internals and thus can contribute to long term operation of nuclear power plants. This paper is about development of certified methodology of thermal annealing of RPV internals and it introduces first results of thermal annealing of unirradiated material and following mechanical testing.

### Úvod

Regenerační žihání tlakových nádob reaktorů (TNR) se stalo verifikovanou technologií pro obnovu mechanických vlastností použitých materiálů. První výzkum v této oblasti začal již v 70. letech 20. století. [1, 2]

Naproti tomu vnitřní části reaktorů (VČR), které jsou během provozu vystaveny silnému ionizujícímu záření a nepříznivému prostředí chladiva [3], nejsou monitorovány žádnými svědčnými programy a žádný proces pro obnovení mechanických vlastností dosud nebyl realizován.

ÚJV Řež, a. s., Divize integrita a technický inženýring ve spolupráci s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze realizuje mezi lety 2017 až 2020 projekt pro zajištění dlouhodobého provozu VČR, jehož hlavním cílem je návrh, vývoj a certifikace postupu pro obnovení výchozích vlastností vysoce ozářeného materiálu VČR typu VVER-440 metodou regeneračního žihání. Úspěšné řešení tohoto projektu pomůže přispět k prodloužení životnosti jaderné elektrárny a zároveň ke snížení množství radioaktivního odpadu.

### Plán projektu

Prvním krokem řešení projektu bylo navržení vhodných žihacích režimů a jejich následná aplikace na výchozí (neozářené) materiály VČR. Znalost mechanických vlastností výchozího materiálu VČR před a po žihání je důležitá z hlediska následného hodnocení výsledků zkoušek

na ozářeném materiálu. Základem experimentálního programu pro posouzení vlivu regeneračního žíhání na materiály VČR je stanovení hodnot tvrdosti podle Vickerse doplněné o měření instrumentované tvrdosti (metoda ABIT – Automated Ball Indentation Test) a zkoušky statické lomové houževnatosti na vzorcích typu mini CT (rozměr ZT je 10 x 10 x 4 mm). V závěrečné fázi experimentálního projektu bude také posouzena odolnost materiálů VČR vůči působení prostředí primárního okruhu JE prostřednictvím korozně mechanických zkoušek v autoklávu.

Na základě analýz materiálů VČR ve výchozím stavu je plánována selekce vhodného režimu pro aplikaci na ozářený materiál VČR. Mechanické vlastnosti budou měřeny na ozářeném materiálu před i po žíhání s použitím totožných experimentálních metod jako ve výchozím stavu.

Po potvrzení vhodnosti zvoleného žíhacího režimu bude následovat certifikace postupu pro regenerační žíhání materiálu VČR.

## **Materiál**

Vnitřní části reaktoru typu VVER-440 jsou vyrobeny z austenitické oceli s označením 08Ch18N10T (ekvivalent oceli AISI 321). Pro řešení projektu má ÚJV Řež, a. s. k dispozici ozářený materiál z uzavřené JE Greifswald (VVER-440/213), která byla 15 let v provozu. Chemické složení materiálu i výsledná radiační dávka jsou uvedeny v tabulce 1 a v tabulce 2.

Pro první fázi projektu – žíhání neozářených materiálů – byla vyrobena zkušební tělesa z bloku materiálu 08Ch18N10T. Zkušební tělesa jsou kvádry o rozměrech 12 x 12 x 60 mm. Vybraná zkušební tělesa byla následně deformačně zpevněna – redukcí tloušťky zkušebního tělesa o 10 %, resp. o 20 %.

## **Žíhací pec a žíhací režimy**

Laboratoř ÚJV Řež, a. s. je vybavena pecí, která je určena pro žíhání materiálů v ochranné atmosféře. Pec je navržena k následné instalaci do horké komory laboratoře, aby bylo možné žíhat ozářený materiál VČR.

V první fázi projektu bylo stanoveno pět žíhacích režimů – teploty: 550, 600, 700, 800 a 900 °C, rychlost ohřevu byla 10 °C/min a doba výdrže na teplotě byla zvolena 6 hodin. Zkušební tělesa byla žíhána na vzduchu a chladnutí probíhalo také na vzduchu při zavřené peci až do 50 °C, aby byl lépe simulován vliv velikosti žíhaných VČR.

Deformačně nezpevněná zkušební tělesa byla žíhána na všech pěti zvolených teplotách. Deformačně zpevněná tělesa byla žíhána při teplotách 550, 700 a 900 °C.

Průběh žíhání pro všechny zvolené teploty je uveden v grafu na obr. 1.

## **Měření tvrdosti**

Měření tvrdosti neozářených zkušebních těles probíhalo před žíháním a po žíhání pro určení změny mechanických vlastností vlivem různých žíhacích teplot. Pro měření byl použit tvrdoměr Indentec ZHV30 určený pro měření tvrdosti dle Vickerse, který je instalován v polohorké komoře laboratoře a umožňuje v rámci projektu zkoušky v neozářeném a ozářeném stavu. Použitá zátěžná síla byla 49,03 N.

Výsledky měření tvrdosti jsou shrnuté v tabulce 3 a v grafu na obr. 2.

## **Závěr**

Očekávaným výstupem provedených experimentů bylo snížení tvrdosti materiálu následkem žíhání. Toto bylo potvrzeno pro všechny žíhací teploty mimo teploty 700 °C, kdy došlo k menšímu snížení tvrdosti (v jednom případně dokonce k jejímu zvýšení). Důvodem tohoto zvýšení tvrdosti může být tzv. sekundární tvrdost.

Oblast žíhání okolo teploty 700 °C bude muset být dále prověřena, aby byl určen interval teplot, který nebude pro regenerační žíhání materiálů VČR vhodný. Dalšími kroky v řešení projektu budou zkoušky lomové houževnatosti na neozařených vzorcích před a po žíhání. Následovat bude selekce vhodného žíhacího režimu a jejich aplikace na ozařený materiál.

Projekt TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

## Literatura

- [1] ISOE European Technical Centre – CEPN Information Sheet No. 12 (1997): *Occupational exposure and reactor pressure vessel annealing*. (dostupné online na: <http://www.isoe-network.net/publications/pub-resources/pub-info-sheet/etc-information-sheets/198-etc-12/file.html>) (28. 8. 2017)
- [2] Brumovský, M., Ahlstrand, R., Brynda, J., Debarberis, L., Kohopaa, J., Kryukov, A., Server, W. (2008): *Annealing and re-embrittlement of RPV materials, State of the art report*. ATHENA WP-4, AMES Report N. 19. JRC 46534, EUR 23449 EN.
- [3] International Atomic Energy Agency (2007): *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Vessels Internals*, 2007, IAEA-TECDOC-1557.

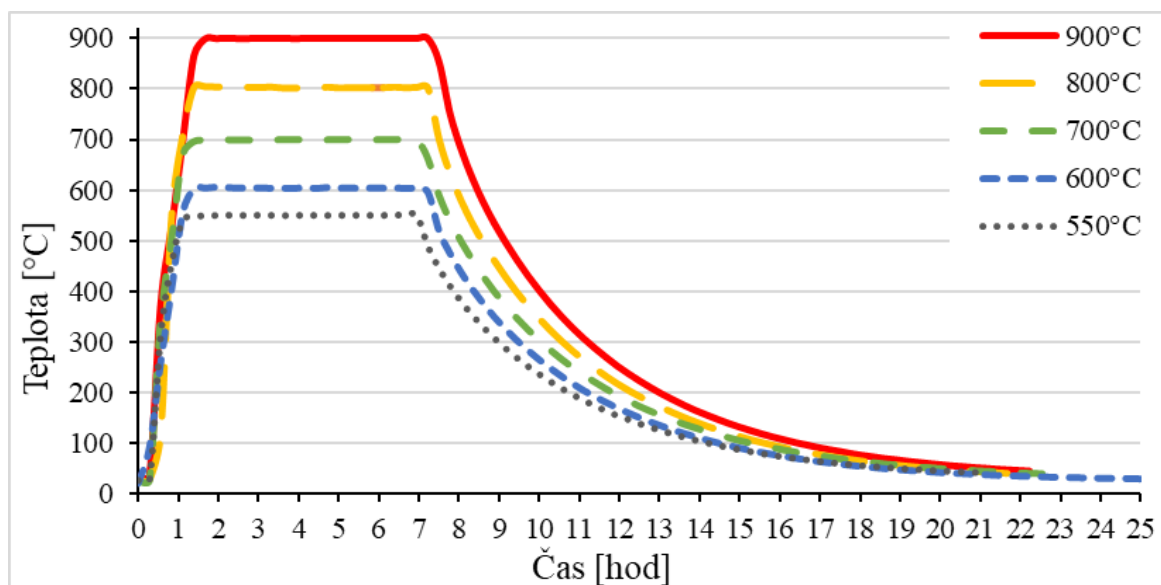
## Tabulky a obrázky

Tabulka 1: Chemické složení materiálu 08Ch18N10T

Materiál	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti
08Ch18N10T	≤ 0,08	1,0 – 2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥ 5C ≤ 0,6

Tabulka 2: Výsledná radiční dávka pro zvolený materiál

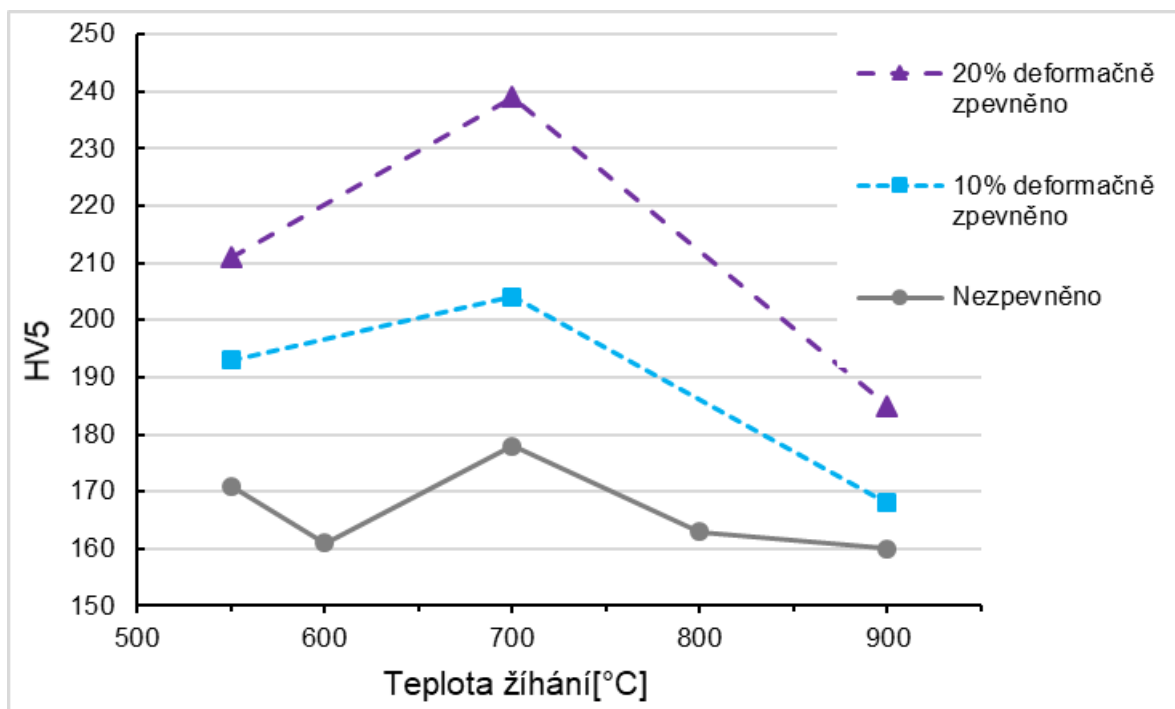
Ozařeno	2,4 dpa	5,2 dpa	11,4 dpa
Komponenta	Nosný válec 36 mm prstenec	Plášť koše aktivní zóny 32 mm prstenec	Hraněný plech 8 mm plát



Obr. 1: Záznam žíhacích režimů ze žíhací pece pro pět různých teplot

Tabulka 3: Výsledky z měření tvrdosti HV5 neozářeného materiálu před a po žihání

STAV	ŽIHACÍ TEPLOTA					
	Nežiháno	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
Nezpevněno	181	171	161	178	163	160
10 % deformačně zpevněno	192	193	-	204	-	168
20 % deformačně zpevněno	243	211	-	239	-	185



Obr. 2: Graf znázorňující změnu tvrdosti v závislosti na žihací teplotě

# IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH OCELÍ S VYUŽITÍM UMĚLÉ INTELIGENCE

## IDENTIFICATION OF MATERIAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS WITH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Petr Polcar<sup>a)</sup>, Ladislav Kander<sup>b)</sup>, Jan Lazar<sup>a)</sup> a Petr Kindelmann<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 001 Plzeň, Česká republika

<sup>b)</sup> Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

### Abstrakt

Znalost materiálových parametrů použitých konstrukčních ocelí je klíčová pro návrh a analýzu komponent využívaných v energetice i v jiných disciplínách technické praxe. Pro identifikaci těchto parametrů jsou běžně využívány série zkoušek a testů. Předkládaný příspěvek prezentuje výsledky výzkumu umožňujícího s využitím umělé inteligence, v našem případě neuronové sítě, výrazně snížit množství experimentů potřebných pro identifikaci materiálových parametrů a s nimi spojené náklady. Tato možnost je demonstrována na příkladu odhadu materiálových parametrů ocelí využitých v kritických komponentech parních turbín bez provedení tahové zkoušky a zkoušky lomové houževnatosti. Prezentované výsledky výzkumu a vývoje vznikly v rámci projektu TAČR č. TE01020068 Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky, pracovního balíčku WP8 Výzkum a vývoj nových zkušebních metod pro hodnocení materiálových vlastností.

### Abstract

The knowledge of material parameters of construction steels is the key for the proper design and analysis of the components used in power engineering and in other disciplines of technical practice. To identify these parameters, series of tests and measurements are commonly executed. Presented paper describes how to significantly reduce the number of tests required for the identification of these parameters with the use of artificial intelligence, namely the neural network is used in this case. Together with the reduction of tests comes the reduction of costs as well. The presented method is demonstrated on the example of the estimation of material parameters of steels used in the critical components of steam turbines without the need to carry out the tensile and fracture toughness tests. Presented results of research and development were carried out within the TAČR project TE01020068 Centre of Research and Experimental Development of Reliable Power Engineering, work package WP8 Research and development of new test methods for the evaluation of material properties.

### Úvod a motivace

Jednou z aktuálních výzev současné energetiky je snaha zajištění spolehlivého a bezpečného provozu komponent, které jsou již delší dobu v provozu. Pro dosažení tohoto cíle je nutná dobrá znalost aktuálního stavu materiálu a opotřebení provozních součástí. Tato znalost umožňuje optimální ekonomické plánování obměny a údržby komponent energetických zařízení při současném zajištění spolehlivosti a bezpečnosti. Pro vyhodnocování zbytkové životnosti a stanovování skutečných hodnot pevnosti či odolnosti proti náhlému lomu jsou obvykle využívány různé testovací metody, které s sebou nesou určité provozní náklady. Jednou z těchto metod je tzv. penetrační test (obvykle nazýván anglicky Small Punch test, SPT [1]), který je využíván jak k vyhodnocování aktuálního stavu mechanických vlastností komponent energetických zařízení, tak pro určování tzv. nulového stavu nově vyrobených komponent pro následné průběžné sledování provozního opotřebování, viz obr. 1. SPT je vhodně doplňován tahovou zkouškou a lomovou zkouškou tak, aby došlo k identifikaci mechanických parametrů, které přímo



z SPT vyhodnotit nelze. Tyto testy je nutné v průběhu provozu komponent opakovat tak, jak se materiály provozem postupně opotřebovávají a jejich mechanické parametry se zhoršují.

Každý provedený test s sebou nese určité náklady. Cílem prezentovaného výzkumu je z dlouhodobého hlediska snížit nároky na počet testů nutných k určení požadovaných materiálových parametrů přípravou algoritmu, který s využitím umělé inteligence (konkrétně technologie neuronových sítí) dovede predikovat požadované hodnoty přímo z SPT testu bez nutnosti provádění tahové zkoušky.

### **Neuronové sítě**

Neuronová síť [2] je jednou z možností, jak matematicky modelovat tzv. umělou inteligenci. Svým principem vychází z chování biologických organismů, kdy základní prvky, tzv. neurony (dříve také nazývány perceptrony), které mají libovolné množství vstupů, kterými mohou být vnější vstupy či vstupy z předcházejícího neuronu (v případě vícevrstevných sítí), a jeden indikovaný výstup. Pro každý vstup definujeme jeho váhu a tzv. prahovou hodnotu, od které neuron generuje výstupní signál definovaný pomocí tzv. přenosové funkce.

Neuronové sítě umožňují tzv. učení. To lze realizovat např. tak, že je požadovaný výstup porovnáván s aktuálním výstupem a síť je následně modifikována tak, aby byl zjištěný rozdíl minimalizován. Dalším způsobem je nastavení sítě tak, aby poskytovala stejnou odezvu při stejných či podobných vlastnostech vstupu. Při využití srovnávacího přístupu, tzv. učení s učitelem, roste kvalita sítě s množstvím zpracovaných dat (učitelů), zjednodušeně lze konstatovat, že čím více poskytneme síti učitelů, tím lépe se naučí zpracovávat požadované signály.

### **Metodika určování materiálových vlastností s využitím neuronové sítě**

Aktuálně vyvíjené a testované metodiky spočívají v tom, že na vzorku daného materiálu je proveden jak penetrační test, tak tahová a lomová zkouška. V prostředí Matlab s balíčkem Neural Network Toolbox [3] byly vytvořeny programy, z nichž každý obsahuje neuronovou síť. Po realizaci penetračního SPT testu je jeho záznam přiveden pomocí příslušných programů na vstup každé neuronové sítě. Za pomoci známých výsledků z tahové a lomové zkoušky jsou jednotlivé neuronové sítě trénovány tak, aby jejich výstupem byly jednotlivé požadované materiálové parametry - mez pevnosti  $R_m$ , mez kluzu  $R_{p0,2}$ ,  $J$  integrál  $J_{0,2}$ , viz obr. 2. Teorie neuronových sítí naznačuje možnost, že pokud neuronové sítě dostatečně natrénujeme pomocí známé dvojice výsledků SPT test a příslušná zkouška, bude možné napříště zmíněné materiálové parametry odhadnout s využitím neuronové sítě přímo z SPT testu, bez nutnosti provádět tahovou a lomovou zkoušku. Možnost eliminace potřeby těchto zkoušek slibuje značnou úsporu prostředků.

Pro komplexní ekonomickou analýzu je nutné stanovit, kolik zkoušek je potřeba pro dostatečné naučení neuronové sítě tak, aby byly materiálové parametry identifikovány s předem stanovenou přesností. Vzhledem k tomu, že každá provedená zkouška nutná k natrénování sítě s sebou nese určité náklady, může celková suma těchto nákladů na trénink převýšit úsporu v budoucnu dosaženou tím, že některé zkoušky nebude potřeba provádět. S podporou TAČRu obě pracoviště autorů aktuálně vyhodnocuje řadu materiálových testů, trénuje neuronové sítě a pokouší se na základě praktických zkušeností zodpovědět, jaké jsou náklady na trénink, jak množství provedených testů ovlivňuje přesnost výstupních parametrů z neuronové sítě a pro jaké materiály a které jejich parametry je tento přístup vhodný a pro které nikoli.

## Zkušenosti s využitím metodiky

Pro praktické otestování popsaného postupu byly zvoleny materiály využívané ke konstrukci kritických částí komponent energetických zařízení, jako jsou parovody, rotory turbín aj. Vzhledem k omezeným možnostem tohoto příspěvku se zaměříme na nejzajímavější poznatky.

Studiem výsledků získaných z neuronové sítě nahrazující tahovou zkoušku vyplývá, že u materiálů vykazujících výraznou mez kluzu  $R_{p0.2}$  je shoda experimentů se simulacemi výrazně horší, než u materiálů s nevýraznou mezí kluzu. Tento problém naznačuje omezení modelu, kdy neuronová síť nahrazuje diskontinuitu monotónní křivkou. Po natrénování neuronové sítě s využitím řádově desítek párů vstupních a výstupních dat dosahují chyby výstupů z neuronové sítě, s výjimkou zmíněné meze kluzu, řádově jednotek procent. V případě využití stovek či tisíců párů dat předpokládáme velmi vysokou přesnost výsledků. Aktuálně probíhá vyhodnocování 100 párů vzorků materiálu 0CH18N10T.

Výsledky nahrazení lomové zkoušky neuronovou sítí jsou výrazně pesimističtější. Projevuje se zde malé množství testovacích dat a komplikovanost konstrukce R křivek. Pro důkladné vyhodnocení je nutné provést větší množství experimentů a neuronovou síť lépe natrénovat, aktuálně zjištěné rozdíly se pohybují průměrně kolem hodnoty chyby 18 %.

## Závěr

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že využití umělé inteligence lze využít ke snížení množství potřebných mechanických zkoušek. Přesnost predikce dat s využitím neuronové sítě nicméně závisí na tom, jak byla síť v minulosti natrénována. Jelikož je pro naučení sítě potřeba značná řada vstupních dat, která získáváme z provedených testů, jeví se využití umělé inteligence vhodné v takových aplikacích, kde očekáváme velké množství opakovaných testů, případně tam, kde z minulosti disponujeme velkým vzorkem existujících testovacích dat. I přes aktuálně poměrně nízké množství tréninkových dat (maximálně 100 párů výsledků testu SPT a tahová zkouška) dosahujeme chyby predikce parametrů v jednotkách procent. Tato skutečnost slibuje praktickou využitelnost prezentovaných výsledků.

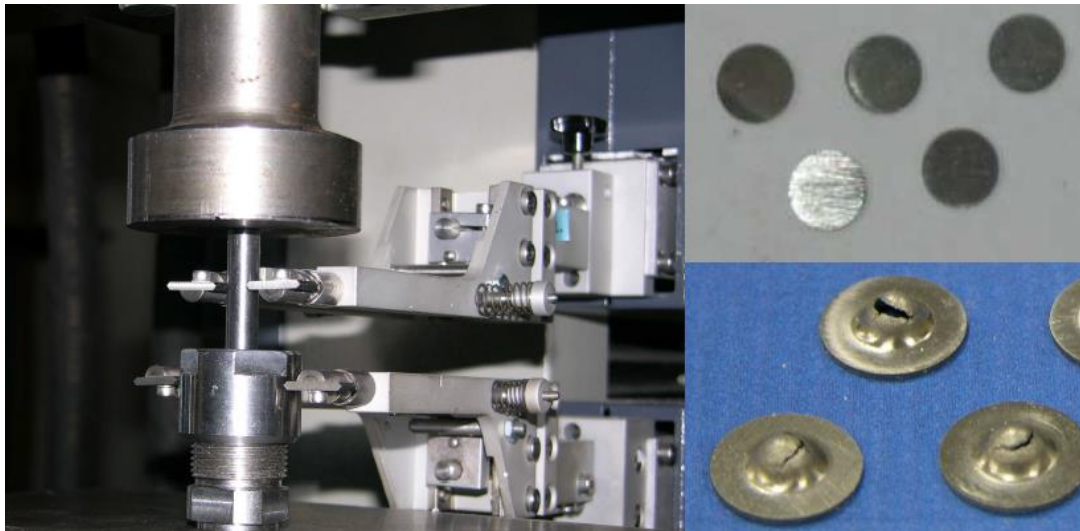
## Poděkování

Prezentované výsledky výzkumu a vývoje vznikly v rámci projektu TAČR č. TE01020068 Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky, pracovního balíčku WP 8 Výzkum a vývoj nových zkušebních metod pro hodnocení materiálových vlastností.

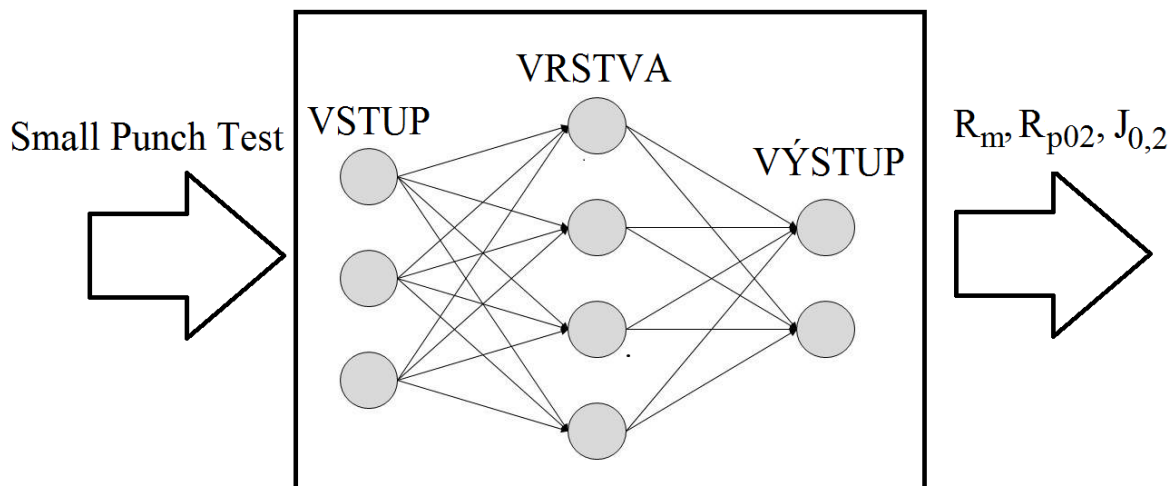
## Literatura

- [1] Volák, J. (2014): *Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu "Small Punch" a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise, dizertační práce*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] Schmidhuber, J. (2014): *Deep learning in neural networks: An overview*, *Neural Networks*, Vol. 61, pp. 85-117. ISSN 0893-6080
- [3] *MATLAB and Neural Network Toolbox*. Massachusetts, United States: MathWorks, Inc., Natick.
- [4] Kander, L., Špička, J. (2017): *Utilization of Neural Networks for Evaluation of Material Properties of Structural Steels based on SPT Results*. *Hutnické listy* č. 4/2017. ISSN 0018-8069
- [5] Špička, J., Kander, L. (2017): *Application of the Neural Networks for Evaluation of Structural Steel Material Properties based on Small Punch Test Results*. *Proceedings of Extended Abstracts of 33rd Conference with International Participation Computational Mechanics 2017*, University of West Bohemia in Plzeň, Špičák, (pp. 131-132). ISBN 978-80-261-0748-4

- [6] Kander, L., Korčáková, L. (2015): *The Influence of Sigma Phase Precipitation on Mechanical Properties of Tp347H Austenitic Steels after 100.000 Hours Service in Coal-fired Power Plant*. Metal 2015, Brno.
- [7] Stejskalová, Š., Kander, L., Hermanová, Š. (2016): *The Change of the Structure and Mechanical Properties of the Austenitic Steels after Exposure at the Critical Temperature*. Metallography 2016, p. 100, Stará Lesná, Slovak Republic.
- [8] Kander, L. (2016): *Precipitation of Sigma Phase in Austenitic Steels Used in Supercritical Conditions*. Metal 2016, p. 103, Brno.



Obr. 1: Vlevo – příklad zařízení pro Small Punch Test (SPT), vpravo – příklad vzorků pro SPT před (nahore) a po testu (dole); převzato z [1]



Obr. 2: Struktura neuronové sítě a princip programu pro identifikaci materiálových mechanických parametrů s využitím neuronové sítě

# STANOVENÍ ÚNAVOVÝCH A TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ POMOCÍ MINIATURIZOVANÝCH TĚLES A DIC METODY

## DETERMINATION OF FATIGUE AND TENSION PROPERTIES BY USING SUB-SIZED SPECIMENS AND DIC METHOD

Eva Chvostová, Ján Džugan a Pavel Konopík

COMTES FHT a.s., Dobřany

### Abstrakt

Jednou z metod pro hodnocení mechanických vlastností materiálů je metoda, která se zaměřuje na použití miniaturizovaných zkušebních vzorků. V tomto článku jsou popsány a porovnány výsledky vysoko cyklové únavy oceli X1CrNiMoAlTi provedené na standardních zkušebních tělesech a miniaturizovaných vzorcích. Dále jsou diskutovány výsledky mikrotahových zkoušek pro zjištění počáteční úrovně napětí pro zkoušky únavy. Použití miniaturizovaného zkušebního vzorku přináší mnoho výhod, jako je snížení nákladů, možnost semidestruktivního odběru materiálu, úspora času.

### Abstract

One method for evaluating the mechanical properties of materials is the use of methods that focus on the use of miniaturized test specimens. This paper describes and compares the results of high-cycle fatigue of X1CrNiMoAlTi steel with the use of on standard test samples and sub sized samples. There are also discussed the results of micro-tensile tests to determine the initial level of stress for fatigue tests The use of miniature specimen brings many advantages such as cost reduction, non-invasive affection of the material, time saving.

### Úvod

Předložený příspěvek představuje potenciál aplikace miniaturizovaných vzorků pro stanovení mechanických vlastností materiálů. Cílem použití těchto metod je stanovení zbytkové životnosti, hodnocení lokálních vlastností materiálu a hodnocení vlastností materiálu v případech, kdy je k dispozici omezený objem experimentálního materiálu (např. vývoj nanomateriálů metodami extrémní deformace). Byla vyvinuta řada nedestruktivních nebo polodestruktivních metod, jako například Small Punch Test (SPT) nebo Automated Ball Indentation (ABI).

Nevýhodou těchto metod je, že pro kvantifikaci vlastností používají některé korelace s omezenou platností, s vyššími tolerančními hranicemi vyplývajícími z nejistot měření a vyhodnocení, rovněž zohledňují různé režimy zatěžování mezi těmito metodami a standardními zkušebními metodami (např. SPT x zkoušku rázem v ohybu, ABI x lomová houževnatost, ...).

Proto je důležitý vývoj metodiky zkoušení mechanických vlastností materiálů pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních vzorků, protože tyto testy mají velmi důležitou výhodu – stejný režim zatěžování jako standardní zkušební vzorky [1]. Problémem s miniaturizací vzorků je především dostupnost vhodných měřicích přístrojů vhodných pro testování vzorků o objemu několika kubických milimetrů. Přesnost siloměru není tak kritická, ale například přímá deformace na vzorku s minimální deformací vyžaduje speciální optické metody, jako je Digital Image Correlation (DIC), které jsou široce dostupné teprve v poslední době. S využitím výhod nejnovějších měřicích zařízení a technik lze úspěšně použít miniaturizované vzorky, které poskytují mnohem spolehlivější data než současně používané metody používající korelační přístup. Taková data mohou být dále použita jako zdroj vstupních dat pro simulaci FEM nebo pro určení místa lomu.

Experimentální program byl proveden na oceli X1CrNiMoAlTi 12-11-2. Byly provedeny zkoušky tahem a zkoušky vysoko cyklové únavy na standardních zkušebních tělesech a na miniaturizovaných zkušebních tělesech. Miniaturizované vzorky byly vyrobeny z polotovaru ode-

braného procesem elektrojiskrového obrábění přenosným odběrovým zařízením EDSE (Electric Discharge Sampling Equipment), které se používá pro extrakci materiálu ze skutečných provozních komponent k hodnocení životnosti reálných součástí tak, aby komponenta zůstala plně funkční a mohla být dále provozována.

### **Mikro-tahová zkouška (M-TT)**

Pro zjištění počáteční úrovně napětí pro zkoušky únavy byly provedeny zkoušky tahem s použitím mikro tahového zkušební tělesa, viz obr. 1a. Zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji LabControl o silové kapacitě 5 kN za pokojových teplot. Zkušební set up je znázorněn na obr. 1b. Měření deformace probíhá pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, který využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation - DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce [2]. Na zkoušený vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech viz obr. 1c.

### **Určení vysokocyklové únavy pomocí miniaturizovaných zkušebních těles**

Zkoušky vysokocyklové únavy na miniaturizovaných vzorcích byly provedeny na servo-hydraulickém zkušebním stroji MTS Bi-ONIX s kapacitou 25 kN v režimu tah – tlak. Testy byly prováděny řízenou silou s koeficientem nesouměrnosti cyklu  $R = -1$  při frekvenci přibližně 50 Hz a pokojové teplotě. Porovnání velikosti se standardním vzorkem VCÚ je na obr. 2. Výsledky testů jsou uvedeny jako počet cyklů do lomu, které jsou vyneseny v závislosti na amplitudě napětí v semilogaritmickém měřítku. Vzorky, které dosáhly  $10^7$  cyklů, jsou označeny šipkami. Výsledky mají poměrně velký rozptyl, proto je mez únavy  $\sigma_C$  vyhodnocena jako maximální amplituda napětí, při kterém vzorek nepraskl ani po  $10^7$  cyklů. Na této úrovni napětí byly provedeny dva platné testy. Porovnání výsledků nestandardních a standardních únavových testů je uvedeno na obr. 3.

### **Diskuze výsledků**

Získané výsledky tahových zkoušek získaných použitím miniaturizovaných a standardních vzorků byly téměř identické a byly dosaženy bez numerických korelací. Průměrné hodnoty byly mez kluzu  $R_{p0,2}$  1593 MPa při použití M-TT tělesa a 1592 MPa pro standardní těleso, u meze pevnosti byl rozdíl 2 MPa, 1646 MPa resp. 1648 MPa, tažnost se lišila o 0,6 %, tj. 10,9 % resp. 11,5 %. To ukazuje na velmi dobrou shodu výsledků. Podle získaných výsledků zkoušek tahem byly aplikovány první úrovně zatěžování vysoko cyklové únavy.

Porovnání dosažených výsledků pomocí nestandardních a standardních únavových testů je uvedeno na obr. 3. Mez únavy byla určena na 730 MPa při použití standardních těles a 720 MPa u miniaturizovaných těles. Výsledky testů při použití miniaturizovaných zkušebních těles vykazují vyšší rozptyl. Tento fakt prezentuje i horší přizpůsobení lineární regrese oproti standardní regresi. To je očekávaný rys a může být způsoben několika faktory, jako je nehomogenita oceli, která je reprezentována sekundárními částicemi v dané oblasti, citlivostí na vruby nebo na stav povrchu zkušební vzorku. Výsledky získané s použitím obou typů těles přineslo velmi podobné výsledky, rozdíl 10 MPa, což je velmi pozitivní výsledek. Po zkouškách únavy byl u vybraných vzorků zkoumán povrch lomu pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6380. Fraktografie nestandardních vzorků vykazuje dobrou shodu ve srovnání se standardními vzorky. Na lomových plochách byly pozorovány jemné postupové čáry a počátek lomu. Nejčastěji byla iniciace lomu způsobena náhodně rozptýlenými částicemi, které působily jako iniciátor únavové trhliny.

## Závěr

Ocel X1CrNiMoAlTi 12-11-2 se používá pro vysoce zatěžované součásti, jako jsou díly pro letectví, vysokotlaké čerpadla nebo aplikace na moři. Na tyto součásti jsou kladeny vysoké nároky na bezpečnou životnost, a proto je důležité zhodnotit skutečné vlastnosti materiálu po několika letech používání. Pak musí být použita některá nedestruktivní nebo semidestruktivní metoda, aby bylo možné posoudit skutečné vlastnosti a z toho vyplývající zbytkovou životnost. Práce, která je zde prezentována, ukazuje možnost získání výsledků zkoušek vysoko cyklové únavy a zkoušky pevnosti v tahu při použití miniaturizovaných zkušebních těles zatěžovaných stejným způsobem jako standardní vzorky. Tento typ přístupu vede k výrazně vyšší přesnosti měřených dat. Hlavním důvodem vyšší přesnosti, je absence korelace výsledků. Aktuální výsledky jasně ukazují potenciál použití miniaturizovaných zkušebních těles pro určení mechanických vlastností.

Získané deformační křivky M-TT jsou plně srovnatelné s výsledky standardních testů. Výsledky ukazují vynikající shodu při použití standardních zkušebních vzorků a M-TT těles. Provedení zkoušek vysokocyklové únavy potvrdily možnost získání spolehlivých výsledků na základě miniaturních vzorků bez nezbytnosti korelace výsledků.

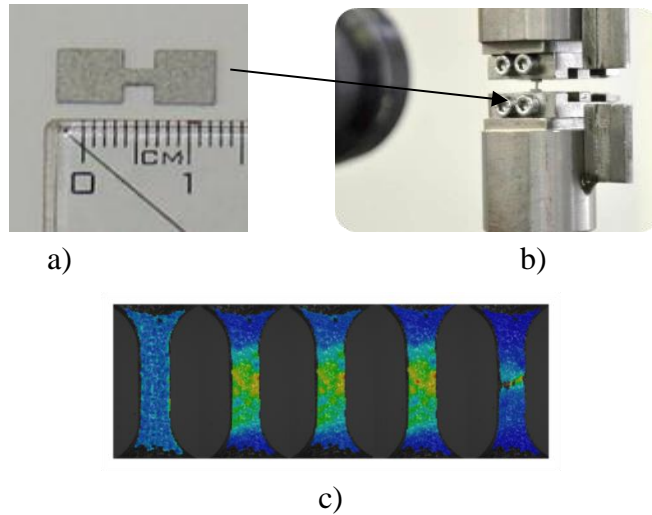
Všechny tyto aplikace ukazují možnost získat spolehlivé a opakovatelné výsledky zkoušek mechanických vlastností materiálů při použití miniaturizovaných standardních zkušebních těles.

## Poděkování

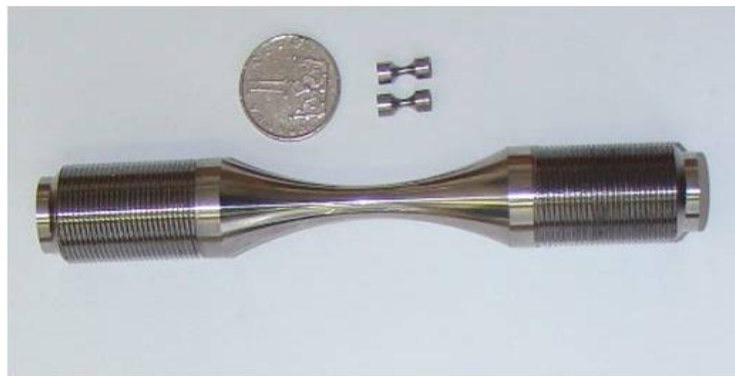
Tento příspěvek byl vytvořen pomocí projektu Posuzování provozuschopnosti zařízení s využitím miniaturních zkušebních těles TH 02020448, financovaný Technologickou agenturou České republiky.

## Literatura

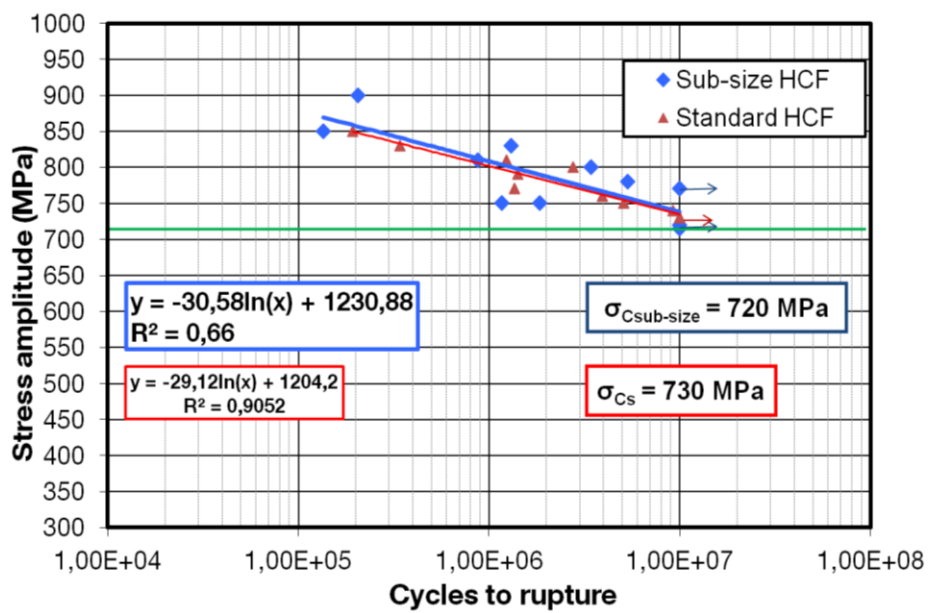
- [1] Džugan, J., Procházka, R., Konopík, P. (2014): *Micro-Tensile Test Technique Development and Application to Mechanical Property Determination, Small Specimen Test Techniques*. 6th Volume, STP 1576, Mikhail A. Sokolov and Enrico Lucon, Eds., pp. 1-19, doi:10.1520/STP157620140022, ASTM International, West Conshohocken, PA 2014 K.
- [2] Konopik, P., Džugan, J. (2012): *Determination of Tensile Properties of Low Carbon Steel and Alloyed Steel 34CrNiMo6 by Small Punch Test and Micro-Tensile Test*. 2nd International Conference SSTT, 2. 10. – 4. 10. 2012, Ostrava, Czech Republic. ISBN 978-80-260-0079-2



Obr. 1: a) M-TT těleso, b) čelisti pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje, c) měření deformace pomocí DIC na mikro-tahových vzorcích



Obr. 2: Porovnání vzorků vysokocyklové únavy



Obr. 3: Porovnání výsledků vysokocyklové únavy pro materiál X1CrNiMoAlTi 12-11-2 při použití standardních a miniaturizovaných zkušebních těles



# ZKUŠENOSTI Z VÝROBY A OVĚŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ NÁTRUBKŮ N6 A N7 PAROGENERÁTORŮ JE TEMELÍN

## THE EXPERIENCE OF PRODUCING AND VERIFYING THE TEST PIECES OF THE HETEROGENEOUS WELDING JOINTS OF THE NOZZLES N6 AND N7 OF THE STEAM GENERATOR OF THE NUCLEAR POWER STATION TEMELÍN

Jana Veselá a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

### Abstrakt

V oblasti nedestruktivního zkoušení slouží zkušební tělesa (ZT) jako tzv. srovnávací měřky, které jsou určeny k nastavení základní citlivosti ultrazvukového přístroje pro zkoušení nátrubků parogenerátoru (PG). Zkušební tělesa by měla co nejvěrněji odrážet zkoušený komponent s ohledem na materiál, jeho zpracování a rozměry. Cílem bylo vyrobit ZT s definovaným rozměrem vady typu trhliny, umístěné v oblasti heterogenního svarového spoje (HSS) nátrubků PG.

Vs-real vyrobená vada by svým charakterem vzniku, umístěním a rozměry měla odpovídat typu vad, které byly na daném zařízení / komponentu již v praxi zjištěny, nebo jejichž výskyt je předpokládán. Pro ověření polohy a rozměru as-real vady je v praxi používána technika Phased Array ultrazvukového zkoušení (PAUT). Při výrobě ZT nátrubků N6 a N7 je tato technika využívána pro ověření polohy iniciačního vrubu, rozvoje trhliny požadovaných rozměrů při dostatečném odstupu vadového echa od šumu a vyhodnocení výšky vzniklé únavové trhliny při odpovídajícím zesílení.

### Abstract

In the field of non-destructive testing, the test pieces serve as so-called comparative gauges, which are designed to adjust the basic sensitivity of an ultrasonic instrument for testing the steam generator. The test pieces should reflect as closely as possible the tested component with respect to the material, its processing and dimensions. The goal was to produce test pieces with a defined flaw-size dimension, located in the steam generator nozzle heterogeneous welding joint.

The as-real defect would, by its nature of origin, location and dimensions, have to correspond to the type of defects already encountered or expected in the facility / component. To measure the position and size of the as-real defect, Phased Array of Ultrasonic Testing (PAUT) is used in practice. The PAUT technique is used to verify the position of the initiation notch, to develop the crack of the required dimensions with a sufficient distance between the defect echo and noise and to evaluate the depth of the fatigue crack due to the corresponding gain.

**Klíčová slova:** parogenerátor, nátrubky, zkušební těleso, ultrazvuk

### Úvod

Mezi časté příčiny poruch zařízení za provozu v oblasti jaderné energetiky patří únavové a korozní poškození materiálu, zastoupené zejména korozí pod napětím. Výjimkou nejsou ani heterogenní svarové spoje (HSS) nátrubků parogenerátorů jaderné elektrárny typu VVER1000. Provádění provozních kontrol HSS technikou PAUT, s využitím ZT k nastavení vyhledávací citlivosti ultrazvukového zkoušení, slouží k včasnému zjištění přítomnosti vady a k případnému sledování jejího rozvoje vlivem provozu zařízení.

## Nátrubky parogenerátoru

Nátrubek periodického odkalu PG s označením N6 obsahuje heterogenní svarový spoj potrubí DN 80. V provozu je pro zkoušení HSS přístupný pouze ze strany uhlíkové oceli a zkoušení PAUT se provádí ručně. Rozměry potrubí jsou 89 x 6 mm a na parogenerátoru se vyskytují 2 nátrubky, tedy celkem na bloku elektrárny je 8 nátrubků typu N6.

Nátrubek trvalého odkalu z kapes kolektorů PG s označením N7 obsahuje HSS potrubí DN 25. V praxi je zkoušení PAUT enkódováno, využívá se manipulátor Cobra a svarový spoj je přístupný z obou stran, tj. ze strany nerezů i uhlíkové oceli. Rozměr potrubí je 32 x 3,5 mm a parogenerátor obsahuje 4 nátrubky, celkem na bloku elektrárny je 16 nátrubků typu N7.

## Zkušební tělesa

Pro výrobu zkušebních těles byly od každého typu nátrubku dodány 2 ks trubek délky cca 300 mm, které byly již rozříznuty v axiálním směru trubky, obr. 1. Vzorky nátrubků N6 a N7, určených k výrobě ZT, byly svařovány v souladu s WPS. K výrobě ZT byly dodány vzorky svařené z nerezového materiálu 08Ch18N10T a materiál nádoby PG je zastoupený uhlíkovou ocelí 12 022.

Výrobě finálních ZT předcházela etapa ověření navržené technologie výroby as-real vady zahrnující i nastavení vhodných parametrů zatěžování pro rozvoj únavové trhliny. K tomuto účelu byla vyrobena interní ZT bez svarového spoje, s homogenním nebo heterogenním svarovým spojem s využitím nerezového materiálu 1.4541 a uhlíkové oceli 11 353.

## Výroba zkušebních těles

Zkušebním tělesem je polovina podélně rozříznuté trubky s HSS. Celkem byla požadována 2 zkušební tělesa pro vybraný typ nátrubku. V zadání výroby byl požadavek, aby každé ZT obsahovalo jednu vadu únavového charakteru o výšce cca 25 % a 50 % tloušťky stěny nátrubku. Pro nátrubek N7 by se jednalo o vady dosahující výšky zhruba 0,9 mm a 1,8 mm, pro nátrubek N6 dosahující výšky 1,5 mm a 3 mm. Vady mají vycházet z vnitřního povrchu v oblasti svarového spoje. Všechna ZT byla identifikována značením na vnějším povrchu, například N7/12-A (N7 – typ nátrubku, 12 – pořadové číslo ZT, A – označení poloviny po rozřezu). Pro iniciaci únavových vad byl na zkušebních tělesech vytvořen vrub jiskřením (EDM) na vnitřním povrchu polovin trubek. Vrub byl umístěn mimo radiální osu heterogenního svaru, blíže k uhlíkové oceli z důvodu simulace výskytu provozních vad. Vruby byly vytvořeny v kořenech svarů do výšky odpovídající převýšení kořenu svaru vůči vnitřnímu průměru trubky. Iniciační vruby byly vyrobeny na zařízení ALIC-1.

Vady typu únavových trhlin byly vytvořeny cyklickým namáháním, v rozsahu 1 až 5 milionů cyklů, na servohydraulických strojích INOVA 100 a INOVA 400. V průběhu cyklování na interních vzorcích byl modifikován přípravek tak, aby zatěžovací síly v daném cyklu vedly k rozvoji únavové trhliny z iniciačního vrubu. Vnější povrch ZT po opakovaném cyklování vykazoval stopu po mechanickém otlaku v místě kontaktu s přípravkem.

K nalezení správného tvaru, rozměru a umístění přípravku byla využita interní ZT se svarovým spojem i bez něho, vyrobená z homogenního materiálu uhlíkové nebo nerezové oceli, případně jejich vzájemná kombinace. Souhrnem bylo vyrobeno cca 30 kusů interních ZT pro odladění postupu výroby reálných ZT obou typů nátrubků N6 a N7.

## Ultrazvukové zkoušení technikou PA

Interní i finální ZT byla podrobena ultrazvukovému zkoušení technikou PA s využitím přístroje Dynaray firmy Zetec a OmniScan firmy Olympus. V praxi jsou pro zkoušení PAUT využívány přístroje Omniscan firmy Olympus nebo Topaz firmy Zetec.

Pro ručním zkoušení nátrubků byly použity sondy Phased Array (PA) firmy Olympus v kombinaci s předsádkami, které generují příčné vlny. Nátrubek N7 (32 x 3,5) byl zkoušený sondou

Olympus s označením 7,5CCEV35-A15 (16 elementů, zkušební frekvence 7,5 MHz) s předsádkou SA15-N60S. Pro zkoušení nátrubku N6 (89 x 6) se použila sonda AS-5 (12 elementů a zkušební frekvence 5 MHz) s předsádkou, která nebyla přizpůsobena většímu průměru nátrubku.

K laboratornímu zkoušení PAUT byl používán kalibrovaný ultrazvukový přístroj Dynaray 128/128PR. Rychlost šíření příčných vln se při zkoušení upravuje podle strany, ze které se HSS zkouší. Při zkoušení ze strany uhlíkové oceli je uvažována rychlost 3250 m/s a při zkoušení ze strany nerezové oceli je uvažována rychlost 3170 m/s.

Iničiační vrub EDM nebyl po vytvoření únavové trhliny maskován. Maskování nebylo nutné provádět z důvodu, že se jedná o tzv. otevřená ZT, určená pracovníkům NDT k nastavení přístroje a současně tréninku zkoušení na těchto srovnávacích měrkách.

Pracovníci, kteří prováděli defektoskopickou kontrolu ZT, jsou kvalifikováni a certifikováni dle požadavků normy ČSN EN ISO 9712 ve stupni 2 nebo vyšším, s praxí zkoušení technikou PAUT.

### **Výsledky zkoušení technikou PAUT**

Celkem byly vyrobeny 4ks ZT nátrubku N6 a 3ks ZT nátrubku N7. Pro zákazníka jsou shrnuty základní údaje o tělesech týkající se značení, výchozího rozměru trubek, materiálu, přítomnosti EDM, vyhodnocení výšky as-real vady typu trhliny, procentuální vyjádření výšky trhliny ve vztahu k výchozí tloušťce stěny trubky a datum detekce. Všechny trhliny byly iniciovány z jiskřeného vrubu EDM na vnitřním povrchu ZT, obr. 2.

Pokud bylo možné, tak smluvní rozměry indikací vad byly určeny přímým svazkem. K vyhodnocení byl také využíván odražený svazek od kořene svaru. Smluvní rozměr byl stanovený poklesem maximální amplitudy vadového echa o 6 dB, tzv. metoda poklesu amplitudy na polovinu. Při vyhodnocování PAUT byla na S-skenu určována maximální výška indikace vady, délka vadové indikace nebyla na C-skenu určována, protože při ručním zkoušení nebyl použit enkodér.

### **Závěr**

Pro měření výšky trhlín v průběhu výroby a na finálních ZT bylo zvoleno ruční zkoušení PAUT bez enkodéru, které umožnilo vyhodnotit výšku trhliny, ale neumožnilo hodnotit délku trhliny. Zákazníkovi bylo předáno celkem 7 kusů ZT, 3 kusy pro nátrubek N7 a 4 kusy pro nátrubek N6, společně s protokoly ultrazvukového zkoušení.

Měření ZT nátrubků N6 nezávislým NDT pracovníkem a jiným systémem PAUT prokázalo přítomnost únavové trhliny z vnitřního povrchu. Měřená výška as-real vad byla v dobré shodě s výsledky CV Řež. Současně byla detekována indikace typu trhliny vycházejících z vnějšího povrchu. Přítomnost trhlín vycházejících z vnějšího povrchu byla při výrobě ZT známa a potvrzena metalograficky na interních ZT, které bylo možné destruktivně hodnotit. Výška trhlín z vnějšího povrchu nebyla vyhodnocena.

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že výroba ZT nátrubků N6 a N7 byla úspěšná s ohledem na dosažené rozměry as-real vad typu trhlín vycházejících z vnitřního povrchu ZT.

### **Zdroje**

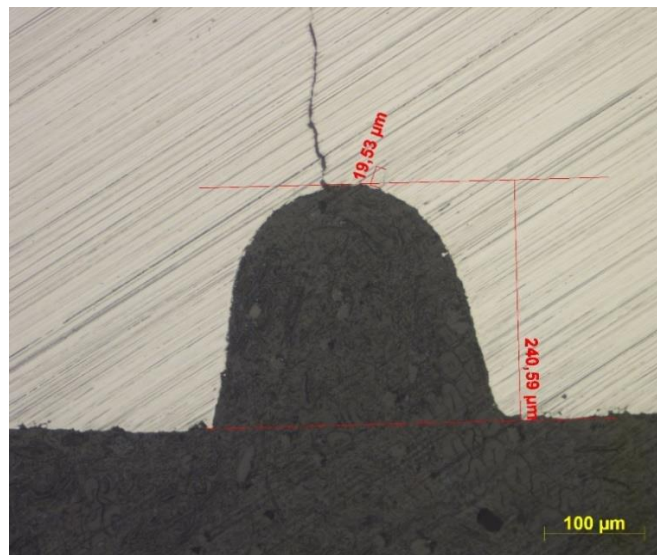
- [1] EPRI, 3002007786 (2017): *Nondestructive Evaluation: Guideline for Conducting Ultrasonic Examinations of Dissimilar Metal Welds, Revision 2*. J. Lindberg, T. Cinson, California, USA.

## Poděkování

Prezentované 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.



Obr. 1: Dodané vzorky a materiál pro výrobu zkušebních těles nátrubků N6 a N7



Obr. 2: Trhlina iniciovaná EDM vrubem po cyklování

# POSTUP HODNOCENÍ FLUENCÍ RYCHLÝCH NEUTRONŮ DOPADAJÍCÍCH NA TNR JE DUKOVANY

## ASSESSMENT OF NEUTRON FLUENCE AFFECTING RPV IN DUKOVANY NPP

Jakub Ertl

Řízení techniky JE, ČEZ a.s.

### Abstrakt

Stanovení fluence rychlých neutronů dopadajících na TNR (tlakovou nádobu reaktoru) JE Dukovany je součástí PŘS (programu řízeného stárnutí) TNR, neboť životnost TNR je negativně ovlivněna absorbovanou fluencí neutronů způsobující postupné zvyšování přechodové teploty materiálů TNR a tedy i pravděpodobnost vzniku křehkého lomu. Tato fluence neutronů je určována pro každou kampaň zvlášť, protože je závislá nejen na délce kampaně, ale také na výkonu palivových souborů umístěných na okraji aktivní zóny.

### Abstract

Determination of neutron fluence affecting RPV in Dukovany NPP is a part of ageing management program because the lifetime of RPV is negatively influenced by absorption of fast neutrons. Neutron fluence causes increase of RPV transition temperature and thus also the probability of brittle fracture. This neutron fluence is assessed for each campaign separately because neutron fluence depends not only on the duration of the campaign but also on the performance of fuel rods located at the edge of the core zone.

### Úvod

Výpočetní stanovení hodnoty fluence rychlých neutronů dopadajících na TNR se provádí v souladu [1, 2] a [3] a spočívá v následujících dílčích postupech:

- stanovení geometrických a materiálových vstupních údajů,
- stanovení zdrojů neutronů v aktivní zóně,
- výpočty základních fluencí a aktivit monitorů fluence,
- stanovení korigovaných fluencí neutronů,
- stanovení hodnoty fluence neutronů s uvážením nejistot měření a výpočtu,
- kvalifikace výpočetního postupu.

### Stanovení geometrických a materiálových vstupních údajů

Ke stanovení zeslabení hustoty toku neutronů je zapotřebí znát uspořádání jednotlivých vrstev komponent AZ (aktivní zóny) reaktoru a vrstev komponent obklopujících AZ až po biologické stínění (beton) v radiálním směru včetně jejich geometrie a materiálového složení. Toto uspořádání je znázorněno na obr. 1.

### Stanovení zdrojů neutronů v aktivní zóně

Stanovení zdrojů neutronů v aktivní zóně reaktoru zahrnuje stanovení jejich rozložení z hlediska prostorového a energetického po celou dobu provozu reaktoru, pro kterou je výpočet hodnoty fluence rychlých neutronů dopadajících na TNR prováděn.

Pro stanovení rozložení zdrojů neutronů v aktivní zóně je důležitý výpočet rozložení zdrojů neutronů v okrajových kazetách aktivní zóny, které přispívají nejvíce k fluenci rychlých neutronů v TNR. Údaje o rozložení paliva v aktivní zóně odrážejí skutečný stav provozované aktivní zóny včetně axiálních profilací. Rozložení zdrojů neutronů se v průběhu palivového cyklu mění, proto jsou do výpočtů zahrnuty údaje z měření skutečného výkonu a jeho distribuce během palivového cyklu.

Výpočet rovněž odráží skutečnost, že změny isotopického složení paliva vlivem vyhořívání mají za následek změnu štěpného spektra neutronů a změnu výtěžku neutronů připadajících na jedno štěpení. Toto je velmi důležité u aktivních zón s nízkým únikem, kdy se na vnější okraj aktivní zóny umísťují palivové kazety s vysokým vyhořením.

### Výpočty základních fluencí a aktivit monitorů fluence

Výpočty prostorově-energetického rozdělení hustoty toku neutronů ve výpočetním modelu reaktoru VVER 440 se provádí programem DORT v P3S8 přiblížení [4]. Program řeší Boltzmannovu transportní rovnici převedenou na soustavu diferencních rovnic iterační metodou s řadou algoritmů urychlujících výpočet.

S cílem získat třírozměrné výsledky výpočtů hustot toku neutronů je axiální únik neutronů zahrnut následující aproximací, ve které jsou užity jednorozměrný výpočet hustoty toku neutronů ve směru R a dvourozměrné výpočty v R- $\theta$  a R-Z geometrii:

$$\Phi(r, \theta, z, E) = \Phi(r, \theta, E) \frac{\Phi(r, z, E)}{\Phi(r, E)}, \quad (1)$$

kde  $r, \theta, z$  jsou souřadnice polohového vektoru.

Tato aproximace je jednou z metod, jak určit třírozměrný tok z dvourozměrných výpočtů.

### Stanovení korigovaných fluencí neutronů

Jedná se o korekce základních fluencí neutronů a aktivací detektorů na základě měření. Pro zpřesnění výsledků transportních výpočtů je použit program LEPRICON. Adjustace (korekce) fluencí neutronů se provádějí nejen na soulad vypočtených a naměřených hodnot fluencí za TNR, ale uvažuje se i konstantní zeslabení fluence neutronů mezi SV a za TNR. Celý postup korekce je zachycen na obr. 2.

Vyhodnocení rozdílu nekorigovaného výpočtu s výsledky měření probíhá v souladu s [3] při každém stanovení výsledné fluence rychlých neutronů na TNR EDU. Pokud rozdíly mezi hodnotami APN (activity per nucleus) z nekorigovaného výpočtu a z měření za TNR jsou větší než 20 %, je nutná adjustace na experimentální hodnoty. Pokud rozdíly mezi hodnotami APN z nekorigovaného výpočtu a z měření za TNR jsou větší než 30 %, je zapotřebí hledat příčiny nesouladu.

### Stanovení hodnoty fluence neutronů s uvážením nejistot měření a výpočtu.

Celková nejistota fluence neutronů stanovená na základě zde uvedeného postupu činí 15 % a je vypočtena na základě kombinované nejistoty  $u_c$ , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2)$$

kde  $u_A$  je nejistota typu A daná statistickým zpracováním souboru dat a  $u_B$  je nejistota typu B způsobená známými nebo odhadnutelnými příčinami.

Nejistota typu A je stanovena na základě statistického zpracování a je ovlivněna variabilitou experimentálních dat. Do této nejistoty jsou zahrnuty nejistoty aktivit monitorů z měření za TNR a nejistoty stanovení aktivit v pozicích SV (svědečných vzorků) zahrnující nejistotu koeficientu zeslabení z pozice SV do pozice za TNR. Nejistota měření aktivit monitorů fluence zahrnuje nejistotu měření četností impulzů, účinnosti detekce na HPGe detektoru, stanovení hmotnosti monitorů fluence, korekce na samoabsorpci gama záření, průběh ozařování, pozice monitorů fluence. Při statistickém zpracování dat byly analyzovány všechny tyto vlivy a výsledná hodnota nejistoty typu A je 13 %.

Nejistota typu B vychází z expertních odhadů dalších zdrojů nejistot v celkovém procesu stanovení fluence neutronů, jako jsou nejistota v účinných průřezích použité knihovny a nejis-

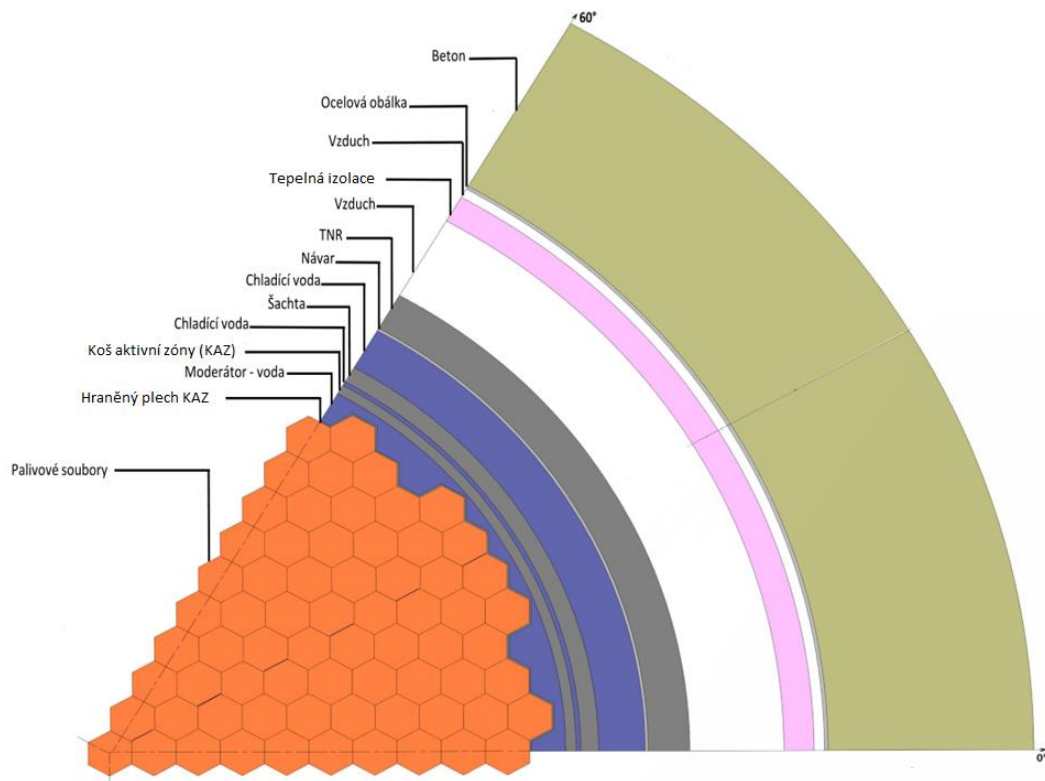
tota zjednodušení výpočtového modelu (zdrojové rozložení na periférii AZ založeno na difúzním kódu, vliv 3D syntézy, časové rozložení výkonu). Nejistota typu B má hodnotu 8 %.

### Kvalifikace výpočetního postupu

V průběhu používání transportních výpočtů pro reálné prostředí jaderného reaktoru musí být vyvinuté výpočetní metody průběžně kvalifikovány (s ohledem na technické možnosti a dostupnost dat). Tento proces kvalifikace byl proveden na třetím bloku JE Dukovany v letech 2005 a 2017 prostřednictvím porovnání s výsledky získanými při odběru vzorků z návaru TNR.

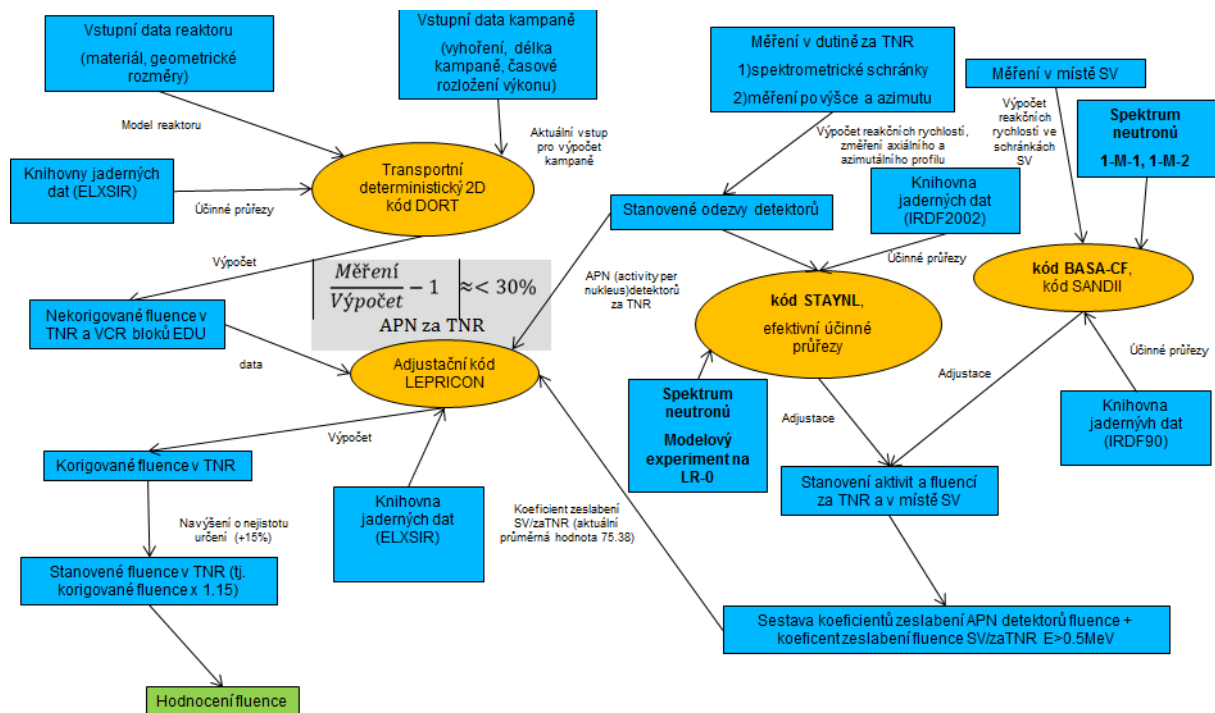
### Závěr

Hodnocení fluence rychlých neutronů dopadajících na TNR je nezbytným vstupem pro hodnocení míry radiačního poškození TNR, která je určena z výsledků mechanických zkoušek svědečných vzorků ozářených na požadovanou fluenci. Na základě hodnocení fluence rychlých neutronů a změn mechanických vlastností svědečných materiálů je potom stanovena aktuální kritická teplota křehkosti a zbytková životnost TNR. Pro tyto účely se využívají maximální hodnoty fluence [ $m^{-2}$ ] a DPA a jejich predikce až do 80. cyklu. Hodnoty fluence [ $m^{-2}$ ] se uvádějí pro neutrony s  $E > 1,0$  MeV a  $E > 0,5$  MeV. Uvedený proces je zachycen na obr. 3.

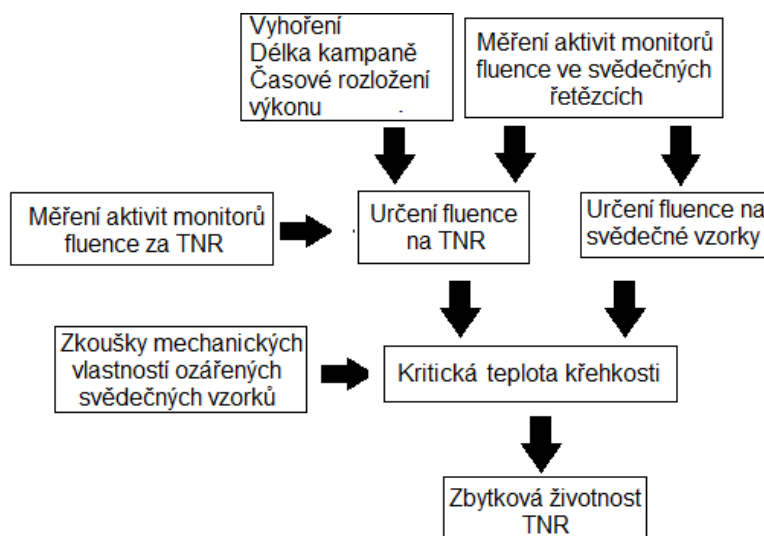


Obr. 1: Uspořádání jednotlivých vrstev AZ a vrstev komponent obklopujících AZ





Obr. 2: Postup korekce (adjustace) vypočtených hodnot fluence na výsledky měření



Obr. 3: Postup hodnocení zbytkové životnosti TNR

## Literatura

- [1] (2016): *Normativně technická dokumentace A. S. I.*
- [2] (2013): *VERLIFE – Unified Procedure for integrity and lifetime assessment of components and piping in VVER NPPs during operation.*
- [3] (2001): *US NRC Computational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence, REGULATORY GUIDE 1.190, US DOE.*
- [4] Rhoades, W. A., Mynatt, F. R. (1988): *The DORT/PC Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code System, CCC-532, RSIC.*

# PREDIKCE PRODLUŽENÍ ŽIVOTNOSTI DETEKTORŮ NEUTRONŮ

## NEUTRON DETECTORS LIFETIME EXTENSION AND PROGNOSSES

Jiří Fleischhans<sup>a)</sup>, Petr Kos<sup>b)</sup> a Jan Švehla<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> OSVČ, odborný konzultant pro neutronová měření

<sup>b)</sup> ČEZ a.s., ETE

### Abstrakt

Metodika výsledky, umožňující predikovat zbytkovou životnost detektorů.

### Abstract

Methods and results of prediction residual lifetime are presented in the paper.

### Úvod

V jaderném reaktoru probíhá současně velký počet štěpení jader uranu, vyvolaných zachytem neutronu. Vznikají 2 produkty štěpení s vysokou energií, a 2 až 3 neutrony (v průměru cca 2,4). Neutrony procházejí celou řadu „nástrah“, snižuje se jejich energie, mohou být absorbovány v konstrukčních a absorpčních materiálech a uniknout ze soustavy. Únikem ze soustavy rozumíme to, že neutrony **mohou vylétnout z aktivní zóny (AZ) překonat bariéru tlakové nádob a dostat se do biologické ochrany** – stínění. Počet unikajících neutronů je přímo úměrný celkovému počtu neutronů v aktivní zóně, to znamená výkonu reaktoru. Počet neutronů v aktivní zóně se pohybuje v rozsahu cca jedenácti řádů. V tomto rozsahu se pohybuje a musí být detekovatelný i výkon reaktoru.

Informace o průběhu štěpení musí být už aktivní od zavezení prvního palivového souboru, musí existovat systém, který je schopen detekovat neutrony v požadovaném rozsahu. Neutron je elektricky neutrální a poměrně snadno prochází hmotou. Je třeba ho nějak „zviditelnit“ a převést na něco dále zpracovatelného, nejlépe na elektrický signál. K tomu se využívají jaderné reakce, ze kterých se po zachytu neutronu okamžitě generují nabitě částice. Nejčastěji se používá reakce na bór  ${}^5\text{B}^{10}$ , ve které vzniká kladně nabitá částice alfa a štěpná reakce na  ${}^{92}\text{U}^{235}$ , kde vznikají 2 štěpné produkty.

### Stanovení výkonu reaktoru

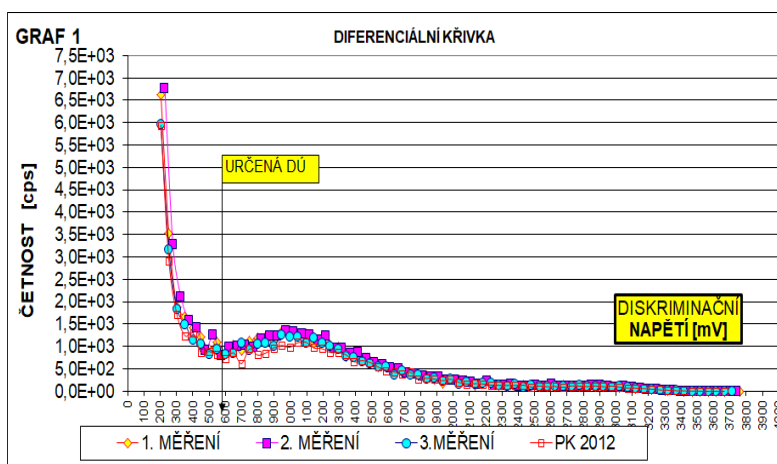
Základním parametrem bezpečného provozu každého reaktoru je znalost jeho výkonu a okamžité změny výkonu. Nelze použít teplotní měření, která vyžadují měřitelné  $\Delta T$ , - je měřitelné od cca 3 % nominálního výkonu ( $N_{\text{NOM}}$ ), a která mají zpoždění dané dobou oběhu média v primárním a sekundárním cyklu. Nepoužitelný je i elektrický výkon turbogenerátoru (TG), který se fází na 40 % nominálního výkonu. Klasickými metodami tedy nelze splnit zejména základní požadavek na měření výkonu na nejnižších úrovních. K měření výkonu je možné použít neutronů, které vylétají do okolí reaktoru prakticky okamžitě. Fyzikálním problémem je jak tyto neutrony detekovat, protože jejich základní vlastností je, že jsou eklekticky neutrální a relativně volně procházejí hmotou. Neutrony mohou vyvolávat při srážce s některými atomy jaderné reakce, jejichž výsledkem je uvolnění částice  $\alpha$  nebo dvou štěpných produktů, které jsou rovněž elektricky aktivní. Na tomto fyzikálním procesu jsou založeny detektory neutronů.

### Detektory neutronů

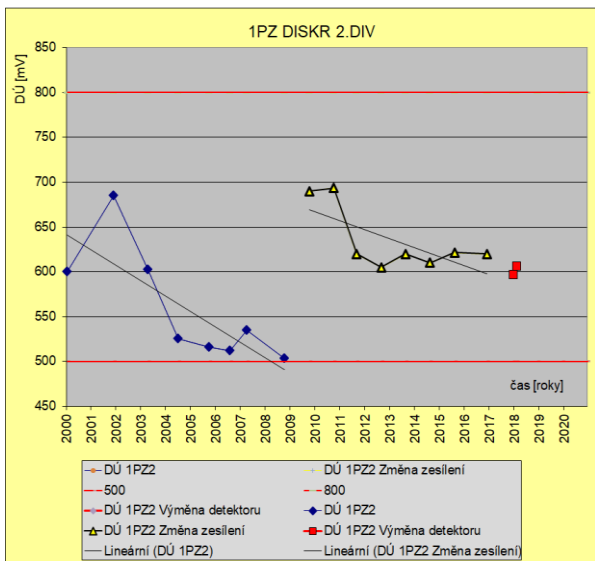
Detektory neutronů jsou vstupními čidly 3 kanálů pro měření neutronového výkonu v bezpečnostním systému reaktoru PRPS (Primary Reactor Protection System), identické v každé ze tří divizí. Rozsah měření víc než 11 řádů, nelze pokrýt jedním měřicím kanálem. Jsou použity 3 kanály, které se navzájem překrývají. Kanál pásma zdroje (PZ) pro nejnižší výkony, kanál širokého pásma (ŠP) od cca  $1\text{E}-9$  do 200 % ( $N_{\text{NOM}}$ ) a kanál výkonového pásma (VP) pro výkony

nad 1 %, ( $N_{NOM}$ ). Dodavatel v dokumentaci uvádí doby použitelnosti detektorů 5 let pro kanály PZ, 10 let pro kanály VP a 40 let pro kanály ŠP. Dále uvádí parametry, které je nutno sledovat a možnosti úprav, kterými lze parametr vrátit do předepsaných mezí. Od začátku provozu na obou blocích jsme archivovali předepsaná měření a sledovali časové trendy. Extrapolace průběhů ukazovala, že limitních hodnot by bylo dosaženo dlouho po dosažení projektové životnosti. Z našich zkušeností z provozu reaktorů ŠR-0 ve ŠKODA JS a na reaktoru Vrabec na FJFI ČVUT vycházelo, že životnost detektorů by měla být podstatně vyšší. Formulovali jsme hypotézu, že z měření a vyhodnocování trendů můžeme predikovat rok dosažení limitní hodnoty kanálů PZ a VP. Hypotézy pro kanály PZ a VP byly kladně posouzeny na katedře jaderných reaktorů FJFI ČVUT [1, 2]. U ŠP jsme se omezili pouze na sledování průběhu předepsaných parametrů, abychom vyloučili odchylky od normálu. Detektory, použité v PZ, VP i ŠP jsou ionizační, tvořené dvěma elektrodami v uzavřeném prostoru, na které je přivedeno vysoké napětí. Primární nabitá částice při pohybu v elektrickém poli ionizuje plynovou náplň, a vytváří další ionty, které se rovněž pohybují k elektrodám. Kromě neutronů reaguje se stěnami detektoru i záření gama s produkcí elektronu, to je parazitní efekt. Podle způsobu zapojení je možné registrovat jednotlivé impulzy-kanály PZ, nebo procházející proud-kanály VP. Kanál ŠP pracuje na nejnižších úrovních v impulzním režimu a dále pak ve speciálním režimu eliminujícím vliv parazitních efektů. Kanály VP mají válcové elektrody pokryté karbidem bóru, jsou proudové, měří proud od cca  $1E-10$  A. Měřený proud je součtem proudů z neutronů i ze záření gama. Obojí je však v rozsahu měření úměrné výkonu reaktoru. Není tedy nutná kompenzace. Jako parametr stárnutí bylo vyhodnoceno vyhořívání bóru, kvantitativně posouzené v [2]. Vliv vyhoření je predikován až po cca 50 letech provozu. Sledovaným a limitovaným parametrem je sklon plata, který nesmí přesáhnout 4 % (obr. 4). Dosavadní měření ukazují, že limitní hodnoty by byly dosaženy za více než 40 roků, což je horizont předpokládaného provozu bloku.

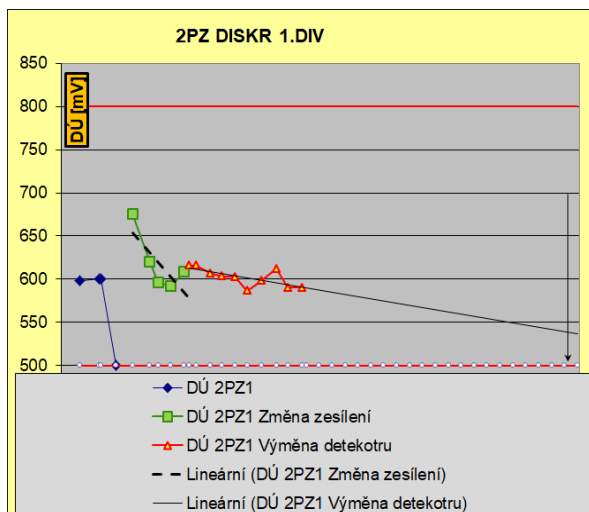
Detektory PZ jsou výrazně složitější, pracují v impulzním režimu, měří od četnosti 0,1 až do  $1E6$  impulzů za sekundu. Pro detekci neutronů se používá reakce na bóru. Ten je ve formě trifluoridu bóru ( $BF_3$ ). PZ má válcovou vnější elektrodu, druhou elektrodu tvoří centrální velmi tenký drátek. Pro kanály PZ je rozhodujícím faktorem hodnota diskriminační úrovně, která se stárnutím detektoru klesá (obr. 1 až obr. 3) z důvodu degradace plynové náplně.



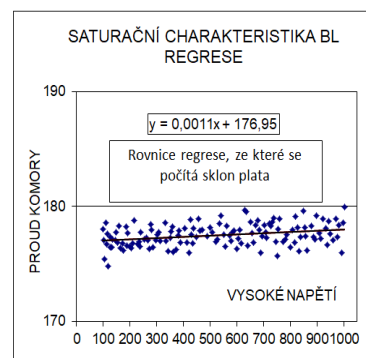
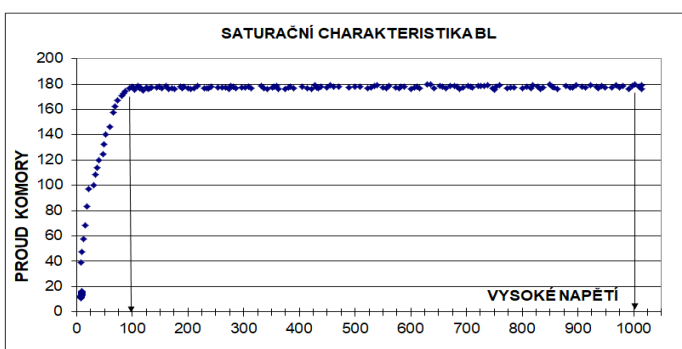
Obr. 1: Impulzy PZ se zobrazují podle velikosti, křivka je počet nad diskriminační úrovní. „Levá křivka“ jsou pulzy od gama a šumů, kopeček vpravo od neutronů. Hledá se taková hodnota, aby bylo zaznamenáno co nejméně pulzů parazitních a co nejvíc neutronových. Optimum je sedlo. Jeho poloha se se stárnutím detektoru posouvá vlevo a je limitována 500 mV.



Obr. 2: Standardní průběh. Po 8 letech změna zesílení, po dalších letech výměna detektoru (trojnásobek projektové hodnoty). Měření v roce 2018. První hodnota při předinstalační kontrole s neutronovým zdrojem, druhá hodnota při spuštění reaktoru.



Obr. 3: Detektor se v prvních 5 letech choval nestandardně, pak správně zareagoval na změnu. Po změně zesílení se objevovaly na nízkých výkonech falešné pulzy, v roce 2009 byl detektor po sedmi letech provozu vyměněn.



Obr. 4: Vyhodnocení sklonu plata. Vpravo na detailu je vidět sklon plata.

Na obou blocích je instalováno celkem	
6 detektorů PZ	X detektorů bylo vyměněno na základě poruchy nezpůsobené stárnutím. V roce 2018 byla dokončena výměna všech detektorů.
6 detektorů ŠP	Všechny v provozu bez výměny.
12 detektorů VP	Vyměněny 2 detektory, jeden s přerušením bodového sváru mezi průchodkou a přívodním kabelem, druhý pro podezření z cizího předmětu uvnitř pracovního objemu. Uznaná reklamáce u WEC.

## Závěry

Byla navržena metodika predikce zbytkové životnosti detektorů neutronů kladně posouzena expertními posudky. Metodika byla prakticky aplikována a plně se osvědčila.

Aplikací metodiky došlo k úspoře cca 69 milionů Kč v nákladech na pořízení nových detektorů a nákladech na výměnu detektorů.

Jako vedlejší produkt byla dodavatelem upravená dokumentace respektující vlastnosti BF<sub>3</sub> (klasifikován jako korozivní a vysoce toxický plyn, takže není možná likvidace detektoru PZ jak RA odpadu). Následně byla ve spolupráci s UJV vyzkoušena neutralizace plynu a v ETE navržena možnost likvidovat obohacený bór (položka dvojího určení podle Atomového zákona).

Dalším přínosem bylo, že jsme vyzkoušeli výměnu detektoru PZ na 100 % nominálního výkonu reaktoru, práce byla provedena s přijatelnou radiační zátěží.

## Literatura

- [1] Kolros, A., FJFI ČVUT v Praze: *Expertní posudek zdůvodňovací zprávy – Postupu k provedení časově omezeného zjednodušeného odhadu životnosti IK, Pásmo zdroje vypracované Ústavem jařeného výzkumu Řez, a.s.*
- [2] Kolros, A., FJFI ČVUT v Praze: *Expertní posudek na Metodiku odhadu životnosti IK výkonové pásmo* vypracovanou Ing. Jiřím Fleischhansem, odborným konzultantem PRPS a Ing. Jan Švehlou, příprávkem I&C ENERGO.

# ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ OCELÍ 12022.1 A 08CH18N10T PŘÍDAVNÝM MATERIÁLEM TYPU SV-07CH25N13

## ORBITAL WELDING OF DISSIMILAR WELD JOINTS OF STEELS 12022.1 AND 08CH18N10T WITH FILLER MATERIAL SV-07CH25N13

Petr Ducháček, Marek Palán a Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s., Technika jaderných elektráren, Řízení zvláštních procesů a technické kvality

### Abstrakt

Příspěvek pojednává o výsledcích nedestruktivních kontrol a destruktivních zkoušek provedených v průběhu kvalifikace orbitálního svařování heterogenních svarových spojů zhotovených z ocelí 12022.1 a 08Ch18N10T přídatným materiálem typu Sv-07Ch25N13. V příspěvku je rovněž provedeno srovnání s výsledky především destruktivních zkoušek provedených na obdobných heterogenních svarových spojkách zhotovených ručním způsobem a také na spojkách zhotovených ručním způsobem přídatným materiálem Sv-10Ch16N25AM6. Cílem použití orbitálního svařování je snížení náchylnosti na působení degračních mechanismů za účelem prodloužení životnosti svarových spojů.

### Abstract

The paper provides the results of the non-destructive and destructive exams which were made during the qualifications of orbital welding of dissimilar weld joints in steels 12022.1 ÷ 08Ch18N10T filler material Sv-07Ch25N13. The paper contains also the comparison with the results of mainly destructive exams made on the resembling manually made dissimilar weld joints and the joints which were manually made with the filler material Sv-10Ch16N25AM6. The target of the application the orbital welding method is to decrease the liability to degradation processes with the aim of extend the lifespan of weld joints.

### Úvod

Heterogenní svarové spoje (HSS) u energetických zařízení bývají nejsledovanějšími místy a často jsou zařazeny mezi rizikové svarové spoje. U jaderných elektráren patří mezi sledované tzv. přípojovací heterogenní svarové spoje jednotlivých komponent. Těmito komponentami jsou například parogenerátory a jejich přírodní a odvodní potrubní trasy.

V předchozích příspěvcích [1] jsme se věnovali HSS typu s provedením N a NK ocelí feriticko-perlitické báze (22K) a austenitické fáze (08Ch18N10T), u kterých byl použit přídatný materiál Sv-10Ch16N25AM6. Řada expertních analýz ukázala slabá místa těchto spojů, kde byl použitý přídatný materiál příčinou vzniku řady heterogenit (kompoziční, fázové, kontinuální povahy), jejichž přítomnost vyústila v etapovitý postup trhliny podél hranice ztavení svarovým kovem. Při splnění podmínek korozního a napětí/ově/deformačního zatěžování lze označit tento mechanismus jako korozní praskání pod napětím (SCC) s časově i funkčně etapovitým průběhem [2].

Za účelem prodloužení životnosti HSS tohoto typu jsou aplikována jednotlivá nápravná opatření. Tento příspěvek uvádí některá z nich.

### Heterogenní svarový spoj 12022.1/22K – 08Ch18N10T

Jakostní uhlíková ocel vyráběná pod ruským (GOST) označením 22K a jakostní uhlíková ocel vyráběná pod českým (ČSN) označením 12022.1 jsou feriticko-perlitické oceli. Ocel 22K je používána k výrobě hlavních částí tlakových nádob parogenerátorů a kompenzátorů objemu. Ocel 12022.1 je nejčastěji využívána pro potrubní trasy.

Korozivzdorná ocel vyráběná pod ruským (GOST) označením 08Ch18N10T je austenitická, titanem stabilizovaná, chromniklová ocel. Z této oceli jsou vyráběny teplosměnné trubky, část potrubí rozvodu napájecí vody parogenerátorů a potrubí.

Spojení těchto dvou rozdílných ocelí může být realizováno přechodovým přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6 nebo Sv-07Ch25N13. Porovnání předepsaného rozsahu chemického složení ocelí a přídavných materiálů je uvedeno v tabulce 1.

Poškozené HSS s přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6 byly v rámci experimentálního programu podrobeny analýzám, ze kterých vzešly doporučení [1]. Na základě těchto doporučení a také zahraničních zkušeností došlo ke kvalifikování postupů svařování s přídavným materiálem Sv-07Ch25N13, který eliminuje segregací oslabení hranic zrn svarového kovu. Pozitivní vliv  $\delta$ -feritu, do 8 %, je popsán v řadě publikací.

Přechodem na tento typ přídavného materiálu a následným využitím orbitálního svařování, u kterého lze sledovat a dokladovat parametry vstupující do zvláštního procesu svařování, lze dosáhnout vysoké kvality HSS. Na obr. 1 jsou uvedeny technologické přístupy spolu s makrostrukturami HSS s přídavným materiálem Sv-07Ch25N13 pro ruční nebo orbitální svařování metodou 141 dle ISO 4063 (TIG).

V oblasti linie ztavení (LZ) svarového kovu a základního materiálu feriticko-perlitické báze vznikají oblasti s velkým koncentračním spádem hlavních legujících prvků. Velikost této oblasti závisí na volbě přídavného materiálu, metodě a parametrech svařování. Šířka oblasti koncentračního spadu hlavních legujících prvků v blízkosti LZ se pohybuje od 5 do 250  $\mu\text{m}$ . Při nevhodných parametrech svařování a nedodržení technologických postupů často vznikají oblasti s vysokými hodnotami tvrdosti, také v blízkosti LZ. Za kvalitativně nepřijatelné považujeme tvrdost přesahující 380 HV ve svarovém spoji. U homogenních svarových spojů vystačíme s klasickou tvrdostí, nejčastěji se využívá HV10. U HSS, vzhledem k šířce rizikových oblastí, je klasická tvrdost nedostačující a využívá se mikrotvrdost, která lépe zmapuje tyto oblasti. Na obr. 2 je průběh mikrotvrdosti HV0,1 ze svarového kovu přes LZ do tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu 22K u porušeného HSS. Pro porovnání viz obr. 3 je výsledek zkoušky mikrotvrdosti HV0,1 pro KSS – HSS zhotovený orbitálním svařováním.

## Závěr

Znalost a porozumění degračním mechanismům materiálů a jejich svarových spojů je důležitá pro rozvoj metod hodnocení zbytkové životnosti těchto technologických celků.

Poslední zkušenosti, spolu s výsledky expertních analýz poškozených HSS, vedly k řadě nápravných opatření, které mají za cíl prodloužit životnost těchto spojů. V rámci těchto opatření došlo ke kvalifikaci postupu svařování s přídavným materiálem Sv-07Ch25N13 a také zavedení orbitálního svařování za účelem vyšší a opakovatelné kvality.

V další etapě se zaměřujeme na ochranu kořenové oblasti před provozním médiem.

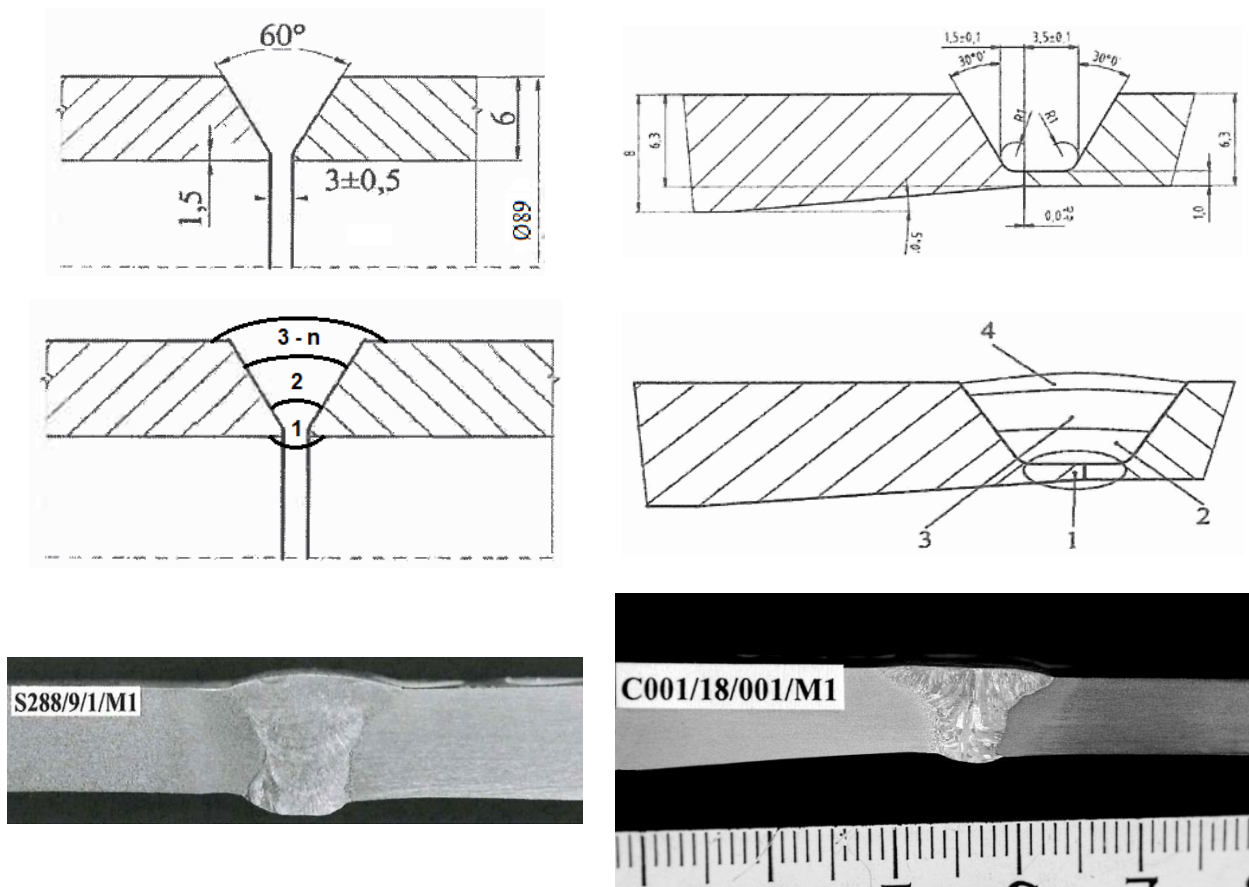
## Literatura

- [1] Ducháček, P., Palán, M., Čančura, Z. (2017): *Heterogenní svarové spoje parních generátorů JE typu VVER 1000 MW zhotovené přídavným svařovacím materiálem typu Sv-10Ch16N25AM6*. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-261-0741-5
- [2] Junek, L. a kol. (2017): *Závěrečná zpráva k Experimentálnímu programu na vybraných heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2. HVB ETE*. Zpráva ÚAM Brno, číslo zprávy ZP6062.docx.
- [3] VÍTKOVICE (1982): *Specifikace materiálu parogenerátoru PGV 1000M, SM1000/80*.
- [4] ČNI (2008): *norma ČSN 41 2022*, 1989.
- [5] (2017): *Protokol kontrolního svarového spoje KSS-2017/EGS/9*, interní dokumentace.

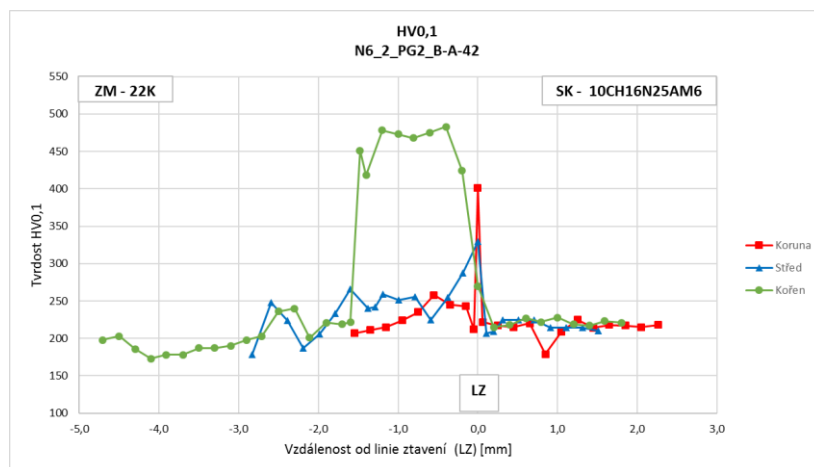


[6] (2018): *Protokol kontrolního svarového spoje KSS-2018-CEZ-03A*, interní dokumentace.

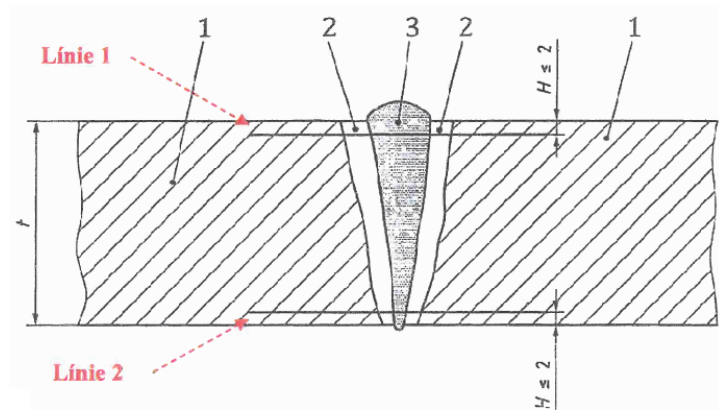
[7] Janovec, J., Junek, M., Horváth, J. (2017): *Analýza heterogenních svarových spojů nátrubků N5.2, N6.1 a N6.2 parogenerátorů 2. HVB ETE*. PowerPoint prezentace v JE Temelín, budova AB - 7. 4. 2017.



Obr. 1: Porovnání technologických přístupů u HSS zhotovených ručním svařováním metodou 141 (vlevo) a orbitálním (plně mechanizovaným) svařováním metodou 141 (vpravo). Jedná se o kontrolní svarové spoje (KSS) mezi základními materiály feriticko-perlitické báze a austenitické fáze s přídavným materiálem Sv-07Ch25N13, převzato z [5, 6].



Obr. 2: Porušený HSS zhotovený montážně s přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6 [7]



Vzorek C001/18/001/M1

HV0,1														
08Ch18N10T				TOO		Sv-07Ch25N13				TOO		12022.1		
Línie 1														
179	180	183	173	169	164	169	162	173	167	168	166	150	144	146
				164						166				
				160						163				
Línie 2														
179	177	179	182	175	174	221	282	291	177	173	175	153	151	152
				176						174				
				173						175				

Obr. 3: Výsledek zkoušky mikrotvrlosti HV0,1 v rámci kvalifikace (KSS) HSS s přidavným materiálem Sv-07Ch25N13 pro orbitální svařování metodou 141 [6]

Tabulka 1: Předepsané chemické složení ocelí a přidavných materiálů v hm. % [3, 4]

Specifikace materiálu pearogenerátoru SM1000/80	Prvek												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Cu	V	Co
<b>Ocel 22K</b>	0,19 - 0,26	0,20 - 0,45	0,75 - 1,05	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,30	0,30 - 0,50	0,10 - 0,15	max. 0,050	-	max. 0,30	0,020 - 0,050	-
<b>Ocel 12022.1</b> (dle ČSN 41 2022)	0,15 - 0,22	0,17 - 0,37	0,50 - 0,80	max. 0,040	max. 0,040	max. 0,25	max. 0,25	-	-	-	max. 0,25	-	-
<b>Svarový kov Sv-10Ch16N25AM6</b>	0,05 - 0,12	max. 0,70	0,80 - 2,00	max. 0,030	max. 0,020	14,50 - 17,00	23,00 - 27,00	5,00 - 7,50	-	-	-	-	-
<b>Svarový kov Sv-07Ch25N13</b>	max. 0,10	max. 1,00	0,80 - 2,00	max. 0,03	max. 0,02	22,00 - 26,50	11,50 - 14,00	-	-	-	-	-	-
<b>Ocel 08Ch18N10T</b>	max. 0,08	max. 0,80	max. 2,00	max. 0,035	max. 0,020	17,00 - 19,00	9,00 - 11,00	-	5xC max. 0,70	-	max. 0,30	-	max. 0,05

- Svarový kov Sv-07Ch25N13 má předepsaný obsah  $\delta$ -feritu 2÷8 %.
- Svarový kov Sv-07Ch25N13 dle požadavku má zpřísněné koncentrace prvků **P** a **S** – max. 0,025 % P a max. 0,018 % S.

# OPRAVA HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE PARNÍHO GENERÁTORU Č. 25 NA JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY TECHNOLOGIÍ WELD OVERLAY

## REPAIR OF DISSIMILAR METAL WELD JOINT OF STEAM GENERATOR N° 25 AT THE NUCLEAR POWER PLANT WITH WELD OVERLAY TECHNOLOGY

Marek Palán, Petr Ducháček a Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s., Technika jaderných elektráren

### Abstrakt

Příspěvek popisuje volbu způsobu, kvalifikaci a provedení opravy heterogenního svarového spoje nátrubku superhavarijního napájení parního generátoru č. 25 jaderné elektrárny Dukovany (typ VVER 440 MW). Jedná se o opravu svarového spoje ocelí 22K a 08Ch18N10T, který je zhotoven s přechodovým návarem přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6, resp. EA395/9. Dlouhodobým provozem a působením degradačních mechanismů dochází k iniciaci trhlin mezi přechodovým návarem a základním materiálem 22K. Zvoleným způsobem bylo provedení opravy progresivní technologií Weld Overlay. Principem této technologie je provedení návaru na opravovaný svarový spoj, jehož účelem je vytvořením tlakového napětí na čele trhliny a tím zamezení jejímu dalšímu šíření.

### Abstract

The paper describes the way of choosing the method, qualification process and implementation of the repair of the dissimilar metal weld. Weld is on the superemergency feed water system of the steam generator No° 25 at the NPP Dukovany (type VVER 440 MW). This is a repair of weld from base material 22K and 08Ch18N10T, which is made with interface from filler material Sv-10Ch16N25AM6 resp. EA395/9. Long-term operation and the effects of degradation mechanisms initiate cracks between interface from filler material Sv-10Ch16N25AM6 resp. EA395/9 and base material 22K. For repair was chosen progressive technology Weld Overlay. The principle of this technology is the Weld Overlay, which is designed to create a pressure stress on the top of the crack and thereby prevent it from further propagation of crack.

### Úvod

Řada konstrukčních řešení energetických komponent, jako jsou například parní generátory, vytváří heterogenní svarové spoje z důvodů spojování rozdílných materiálů. Za provozu může docházet vlivem působení degradačních mechanismů mezi oceli 22K a 08Ch18N10T. K porušení – iniciaci a rozvoji trhlin – dochází v oblasti přechodového návaru na oceli 22K. Přechodový návar je proveden buď metodou 141 dle ISO 4063, nebo metodou 111. V případě metody 141 se jedná o přídavný materiál Sv-10Ch16N25AM6, u metody 111 jsou použity elektrody typu EA395/9 (u obou typů přídavných materiálů je stejné chemické složení a materiálové vlastnosti). Mechanismus porušování tohoto typu heterogenního svarového spoje je podrobněji popsán v [1].

### Konstrukční uspořádání a volba technologie opravy

Na obr. 1 je schematicky znázorněno konstrukční uspořádání nátrubku superhavarijního napájení parního generátoru s vyznačeným kontrolním místem 4.071, kterým je dotčený svarový spoj. Nátrubek má v oblasti svarového spoje průměr 140 mm a tloušťku stěny 14,5 mm. [2]

Na základě výsledků pravidelných provozních kontrol, které jsou v tomto případě prováděny ultrazvukem, technikou Phased Array, bylo rozhodnuto o vyvinutí a kvalifikaci technologie pro provedení trvalé opravy těchto svarových spojů.

Dosud byly opravy prováděny ručním způsobem jako dočasná oprava. Jednalo se o lokální opravu v rámci které došlo pouze ke zmenšení velikosti trhliny na přípustnou velikost, která byla stanovena výpočtem.

S ohledem na provedení nátrubku bylo možno realizovat pouze dvě varianty opravy. První variantou bylo nasazení technologie Weld Overlay, která je určená pro opravy takto poškozených svarových spojů. Druhou možností bylo provedení komplexní rekonstrukce nátrubku superhavarijního napájení parního generátoru.

Při volbě technologie opravy byly stanoveny hlavní cíle, kterých mělo být novou technologií dosaženo:

- trvalý způsob provedení opravy,
- zvýšení technické kvality provedení opravy,
- použitím plně mechanizovaného navařování eliminace lidského faktoru v procesu opravy,
- ochrana parních generátorů před čerpáním jejich životnosti způsobeným komplexní rekonstrukcí,
- snížení tahových napětí ve svarovém spoji,
- vytvoření tlakových napětí na čele trhliny a v kořeni svarového spoje,
- použití návaru jako preventivní opatření pro veškeré nátrubky.

Po provedení analýzy rizik obou u variant a celkovém vyhodnocení z bezpečnostního a technického hlediska bylo rozhodnuto o způsobu provedení trvalé opravy technologií Weld Overlay, která výše uvedené cíle zcela splňuje.

### **Technologie Weld Overlay a provedení opravy**

Princip technologie Weld Overlay spočívá v navaření svarového kovu na vnější povrch v oblasti opravovaného svarového spoje, jak je vidět na obr. 2. Navařením návarového kovu dojde vlivem efektu smrštění vycházejícímu z oblasti návaru k redistribuci napětí v opravovaném svarovém spoji a v oblasti čela trhliny vznikne tlakové napětí. Zároveň dochází k vytvoření tlakového napětí, případně mírně tahového, v oblasti kořene svaru. Tímto způsobem je zamezeno dalšímu šíření trhliny v opravovaném svarovém spoji. Pro navaření musí být použit přídatný materiál, který dosahuje dostatečných hodnot smrštění po navaření. Pro materiálovou kombinaci dotčeného heterogenního svarového spoje byl vyhodnocen jako nejvhodnější přídatný materiál typu Sv-07Ch25N13.

Technologii Weld Overlay lze využít nejen jako korektivní způsob údržby, ale taktéž jako preventivní způsob. V prvním případě je zhotoven návar, který má za úkol přenést navrhované zatížení bez uvažování tloušťky stěny potrubí. Jedná se o tzv. FSWOL – úplný konstrukční návar. Další možností je tzv. OWOL – optimalizovaný konstrukční návar. V tomto případě je uvažováno s 25 % tloušťky stěny potrubí. FSWOL i OWOL může být použit buď jako korek-

tivní nebo jako preventivní opatření. Bližší požadavky na volbu a návrh geometrie návaru jsou uvedeny v NTD A.S.I. Sekce Zvláštní případy, Příklad 01 a 02/2014 z roku 2017.

Pro opravu dotčeného svarového spoje byl vzhledem k charakteru poškození svarového spoje zvolen FSWOL, tedy varianta, která v plné míře plní funkci nosného průřezu. Geometrie návaru vychází z výpočtového návrhu, které zohledňuje velikost trhliny a zajištění proveditelnosti všech nedestruktivních kontrol, především ultrazvukové kontroly technikou Phased Array. Jeden z původních návrhů geometrie návaru je uveden na obr. 3. Součástí výpočtového posouzení je i výpočet zbytkového napětí po navařování, kde výpočtový model vychází ze skutečných hodnot získaných v průběhu navařování.

V souvislosti se zavedením technologie Weld Overlay na jaderných elektrárnách v České republice byly vypracovány legislativní dokumenty pro aplikaci technologie. Tyto dokumenty byly vypracovány v rámci NTD A.S.I. Sekce Zvláštní případy. Na základě získaných zkušeností byly v roce 2017 tyto dokumenty revidovány a byl vypracován nový Příklad 01/2017 pro provádění ultrazvukových kontrol [3].

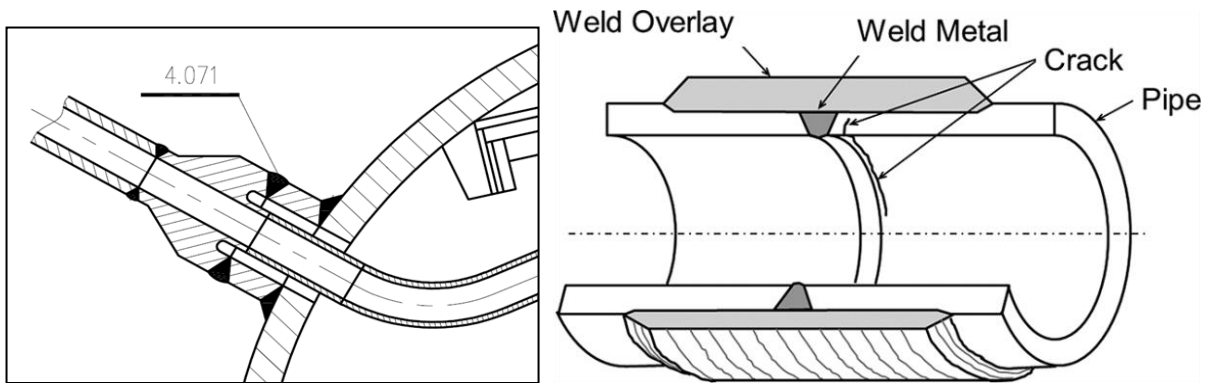
Na obr. 4 a obr. 5 jsou uvedeny fotografie z opravy provedené na parním generátoru (PG) č. 5 na 2. reaktorovém bloku jaderné elektrárny Dukovany.

## Závěr

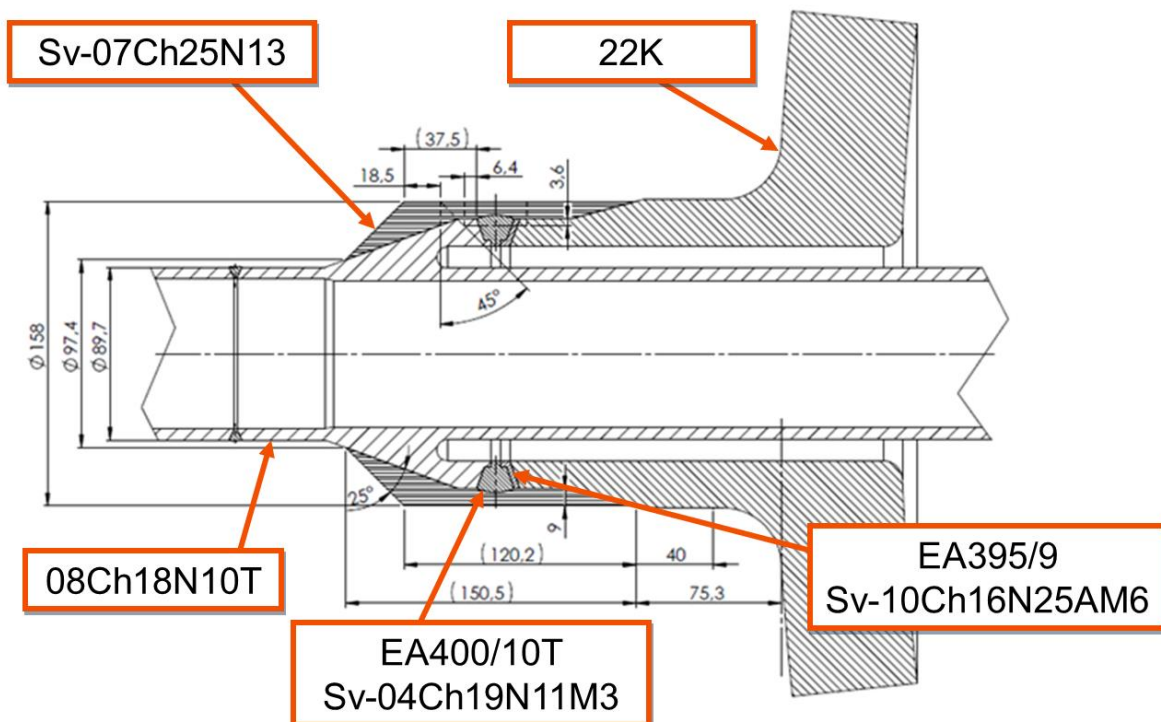
První oprava heterogenního svarového spoje technologií Weld Overlay na jaderných elektrárnách v České republice byla úspěšně provedena v březnu 2018. Konkrétně se jednalo o parní generátor č. 5 na 2. reaktorovém bloku elektrárny Dukovany. Této aplikaci předcházela náročná, bezmála roční, příprava a kvalifikace. Během tohoto období byl zajištěn vývoj a výroba zařízení pro navařování, přídavný materiál, kvalifikace postupu svařování, kvalifikace ultrazvukových kontrol, kvalifikace personálu pro oblast svařování a nedestruktivních kontrol, V současnosti jsou úspěšně dokončeny čtyři opravy technologií Weld Overlay a na zbývajících dvaceti parních generátorech budou opravy provedeny v následujících letech. Do budoucna je předpokládáno nasazení této technologie i na jiné svarové spoje, jejichž oprava je konvenčními způsoby obtížná.

## Literatura

- [1] Ducháček, P., Palán, M., Čančura, Z. (2017): *Heterogenní svarové spoje parních generátorů JE typu VVER 1000 MW zhotovené přídavným svařovacím materiálem typu Sv-10Ch16N25AM6*. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, str. 63-66. ISBN 978-80-261-0741-5
- [2] Palán, M., Hajdík, J. (2018): *Aplikace metody WOL na HSS nátrubku SHN PG JE Dukovany*. In: Svařovací den 2018 (odborný seminář). Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, str. 69-107. ISBN 978-80-248-4179-3
- [3] Palán, M., Mlynář, P. (2018): *Aplikace Weld Overlay jako progresivní technologie pro opravy heterogenních svarových spojů nátrubků superhavarijního napájení parních generátorů JE typu VVER 440 MW*. Zborník prednášok z konferencie Kvalita vo váraní 2018. Bratislava: Výzkumný ústav zvaračský – Priemyselny inštitut SR, 2018, str. 85-91. ISBN 978-80-88734-81-9



Obr. 1 a obr. 2: Nátrubek superhavarijního napájení PG s heterogenním svarovým spojem (kontrolní místo 4.071) a princip technologie Weld Overlay (vpravo)



Obr. 3: Návrh geometrie návaru Weld Overlay na nátrubku superhavarijního napájení PG



Obr. 4 a obr. 5: Dokončené navařování 8. vrstvy návaru (vlevo) a provedení kapilární kontroly na opracovaném návaru (vpravo)

# TEPLOTNÉ STARNUTIE A JEHO MONITOROVANIE V JE NA SLOVENSKU

## THERMAL AGEING MONITORING IN SLOVAK NPPS

Miloš Baľák, Jana Petzová a Marek Adamech

VUJE, a.s., Oddelenie štrukturálnych analýz

### Abstrakt

Monitorovanie teplotného starnutia materiálov primárneho okruhu jadrových elektrární na Slovensku je problematika riešená len od roku 2010. Tento degradačný mechanizmus ako jeden z hlavných degradačných procesov materiálov bezpečnostne významných komponentov primárneho okruhu je potrebné monitorovať z hľadiska bezpečnej dlhodobej prevádzky elektrární. V tomto príspevku je popísaná koncepcia programu monitorovania teplotného starnutia materiálov primárneho okruhu JE na Slovensku, ako aj realizované činnosti súvisiace s týmto programom do súčasnosti.

### Abstract

The thermal ageing monitoring of nuclear power plant primary circuit materials is the issue solved only since 2010. Monitoring of this degradation process is necessary in aspect of NPPs long-term operation as one from the main material degradation process of the safety important component of the primary circuit. The conception of the thermal ageing monitoring program of nuclear power plant primary circuit materials as well as the realized activities related with this program is described in this paper.

### Úvod

Systematické hodnotenie odolnosti materiálov primárneho okruhu (PO) proti vplyvu teplotného starnutia (TS) pri reálnej prevádzkovej teplote jadrovej elektrárne (JE) sa v slovenských JE nevykonávalo. Napriek tomu je práve tento degradačný mechanizmus materiálov stále viac diskutovanou otázkou aj kvôli tomu, že viac ako 63 % energetických reaktorov je v prevádzke viac ako 30 rokov [1].

Úrad jadrového dozoru (ÚJD) SR a Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (MAAE) vo Viedni požadujú [2, 3, 4], aby prevádzkovatelia JE spracovali a zaviedli tzv. program riadeného starnutia. Z tohto dôvodu bolo vypracovaných viacero detailných analýz, z ktorých je zrejmé, že okrem radiačného krehnutia a korózie je najvážnejším ďalším degradačným mechanizmom materiálov PO JE teplotné starnutie.

Ide o krehnutie, ktoré je známe najmä u ocelí s obsahom uhlíka do 0,2 %, dlhodobo prevádzkovaných pri zvýšených teplotách, pričom súvisí najmä s obsahom dusíka a s tzv. povrchovo-aktívnymi nečistotami.

### Koncepcia programu monitorovania TS

Koncepcia programu monitorovania TS vychádza zo zásadnej požiadavky, ktorou je možnosť monitorovania tohto degradačného mechanizmu pôsobiaceho na materiály primárneho okruhu JE počas prevádzkových podmienok na reálnom prevádzkovanom zariadení.

Nakoľko reaktory na Slovensku majú už za sebou niekoľko desaťročí prevádzky, bolo potrebné celkovú koncepciu zhodnotenia vplyvu teplotného starnutia na hodnotené materiály rozdeliť na dva samostatné celky, a to:

- dlhodobá expozícia blokov materiálov, ktoré sú vystavené rovnakej teplotnej záťaži ako reálne monitorované jadrovo-energetické zariadenia (JEZ), pomocou nosiča vzoriek,
- odber vzoriek materiálu z prevádzkovaných zariadení a ich následná detailná materiálová analýza.



## Dlhodobá expozícia blokov materiálov

Pre expozíciu blokov materiálov dôležitých JEZ bolo po kritickej analýze viacero možností navrhnuté použiť špeciálne vyrobený prstencový nosič vzoriek (obr. 1) pre uloženie blokov jednotlivých materiálov, ktorý je umiestnený na povrchu horúcej vetvy hlavného cirkulačného potrubia (HCP) (obr. 2).

Každá krabička s materiálom pre teplotnú expozíciu priskrutkovaná na nosiči vzoriek obsahuje rozmerovo identický blok materiálu PO (obr. 3), z ktorého sa po navrhovaných dobách expozície, spravidla každých 5-6 rokov, vyrobí jedna kompletná séria skúšobných vzoriek, pričom konkrétnu dobu expozície bude možné upraviť podľa potreby a priebežných výsledkov monitorovania.

Zhotovené skúšobné telieska sú podrobované skúškam mechanických a fyzikálnych vlastností, ako aj hodnoteniu stavu mikroštruktúry a subštruktúry metódami svetelnej optickej a elektrónovej mikroskopie. Medzi tieto skúšky patria:

- skúšky rázom v ohybe,
- statickej skúšky lomovej húževnatosti,
- skúška ťahom,
- SPT skúšky – stanovenie medze sklzu, medze pevnosti a prechodovej teploty,
- skúška náchylnosti ocele k starnutiu po plastickej deformácii,
- meranie tvrdosti (mikrotvrdosť a makrotvrdosť),
- stanovenia obsahu  $\delta$ -feritu,
- stanovenie odolnosti proti MKK (štandardnou metódou a metódou EPR),
- hodnotenie stavu mikroštruktúry a subštruktúry metodikami SOM a TEM,
- hodnotenie lomových plôch použitím riadkovej elektrónovej mikroskopie.

Na základe rozboru špecifikácií jednotlivých materiálov, požiadaviek prevádzkovateľa a odporúčaní ÚJD SR boli pre analýzy hodnotenia teplotného starnutia v prevádzkových podmienkach JE v rámci programu monitorovania TS vybrané nasledovné typy experimentálnych materiálov:

- materiály tlakovej nádoby reaktora (TNR),
- materiály HCP a vyrovnávacieho potrubia kompenzátora objemu (VPKO),
- materiály parogenerátora (PG).

### Odber vzoriek z prevádzkovaných zariadení

Tradičný odber skúšobného materiálu z prevádzkovaných zariadení pre zistenie jeho reálneho stavu predstavuje popri nutných odstupkách najmä nevhodný zásah do celistvosti hodnotenej časti, a to či už sa jedná o odber strojným obrábaním, tepelným delením alebo aj inými spôsobmi. Tieto deštruktívne metódy zvyčajne vyžadujú následnú opravu odobratého miesta, vrátane tepelného spracovania a celého radu nedeštruktívnych kontrol. Často sa pritom práve toto miesto môže stať zdrojom problémov pri ďalšej prevádzke.

Na odber vzoriek v rámci programu monitorovania TS sa používa zariadenie, ktoré je koncipované ako univerzálny systém určený na odber vzoriek bez výrazného ovplyvnenia povrchu a bez nutnosti miesto odberu následne opravovať alebo upravovať. Jedná sa o kvázi nedeštruktívny odber materiálu pomocou zariadenia SSam<sup>TM</sup>-2 od firmy Rolls-Royce [5].

Týmto odberovým zariadením bolo doteraz, v rámci tohto programu MTS odobratých 54 ks vzoriek z nasledovných JEZ primárneho okruhu JE Bohunice a Mochovce:

- tlaková nádoba reaktora,
- teleso kompenzátora objemu (KO),
- teleso parogenerátora,

- hlavné cirkulačné potrubie.

Princíp odberu vzorky zariadením SSam<sup>TM</sup>-2 je založený na rýchlej rotácii rezného nástroja v tvare dutej polgule okolo osi súmernosti a jeho pomalého zasúvania po kruhovej dráhe do rezaného materiálu (obr. 4). Oceľový rezný nástroj je pokrytý tenkou vrstvou kubického nitridu bóru (CBN) a umiestnený v odberovej hlavici (obr. 5).

Veľkosť a tvar odobratých vzoriek závisí na geometrii v mieste odberu. Ukážka odberu ako aj odobratej vzorky z tlakovej nádoby reaktora s následným elektroiskrovým rezaním na malé vzorky SPT je na obr. 6.

Takto vyrezané SPT vzorky sa brúšia na konečný rozmer  $0,5 \text{ mm} \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$ . Pomocou progresívnej skúšobnej penetračnej metódy Small Punch Test (SPT) je možné stanoviť na týchto vzorkách nasledovné mechanické vlastnosti:

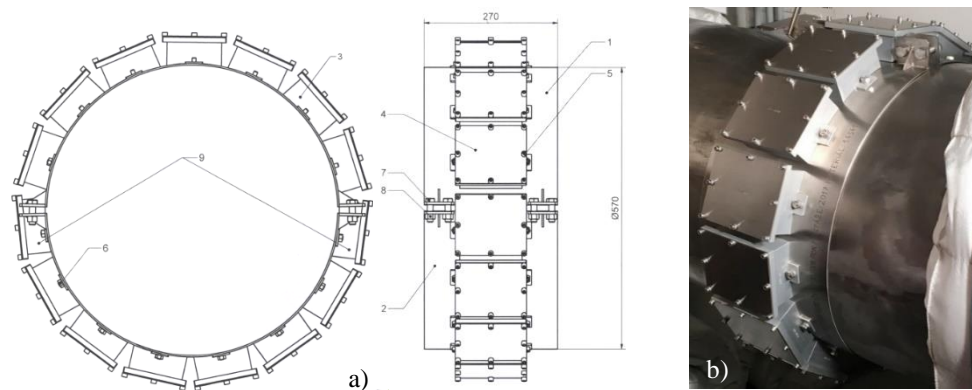
- medzu pevnosti,
- zmluvnú medzu klzu,
- prechodovú teplotu,
- lomovú húževnatosť.

## Záver

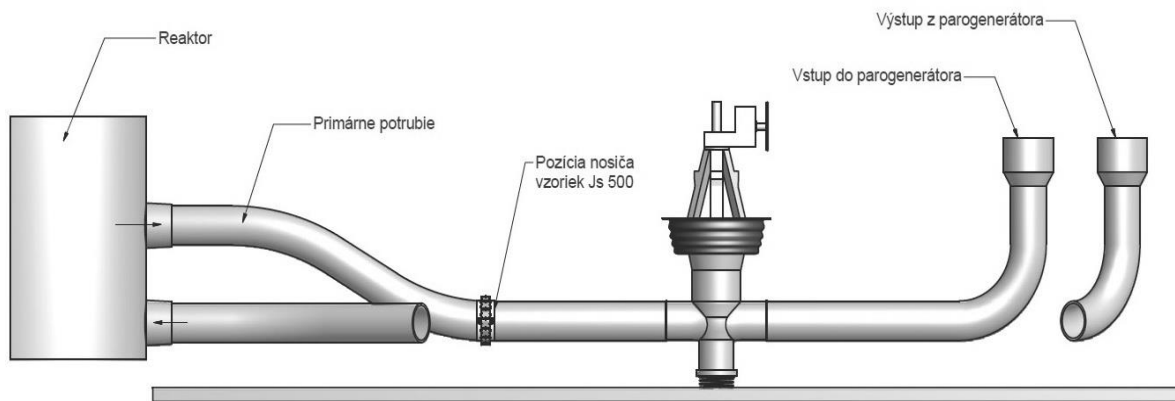
Z uvedenej koncepcie programu monitorovania TS možno konštatovať, že takto navrhnutý a realizovaný program bude spĺňať požiadavky kontrolných úradov, zabezpečí spresnenie informácií o skutočnom stave všetkých dôležitých komponentov PO JE a získa ďalšie spoľahlivé technické argumenty pre dlhodobú prevádzku všetkých slovenských prevádzkovaných jadrových blokov.

## Literatúra

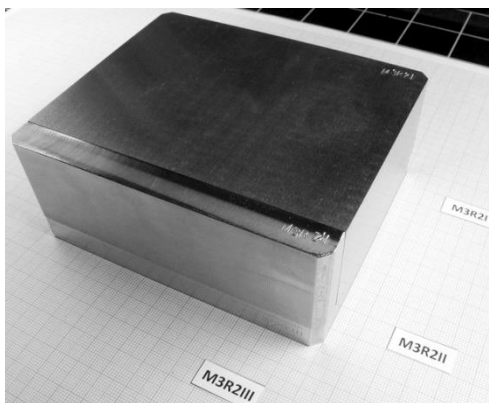
- [1] MAAE (2018): <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx>, Total Number of Reactors.
- [2] ÚJD SR (2002): *Riadenie starnutia jadrových elektrární. Požiadavky*. Bratislava: BNS 1.9.2/2001.
- [3] MAAE (2005): *Ageing Management for Nuclear Power Plants and Research Reactors*. Vienna: SAFETY GUIDE NS G DS382.
- [4] MAAE (2006): *Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors*. Vienna: IAEA-EBP-LTO-20.
- [5] Baľák, J. a kol. (2008): *Využitie systému na odber malých vzoriek pri hodnotení vlastností materiálov prevádzkovaných zariadení*. 11. konferencia: Prínos metalografie pro řešení výrobních problémů, Lázně Libverda.



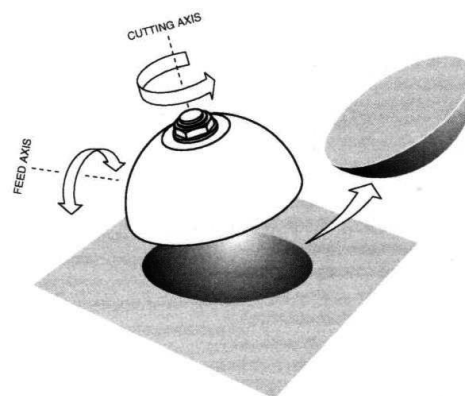
Obr. 1: Nosič vzoriek pre monitorovanie teplotného TS a) konštrukcia, b) montáž v prevádzke



Obr. 2: Umiestnenie nosiča vzoriek na horúcu vetvu hlavného cirkulačného potrubia



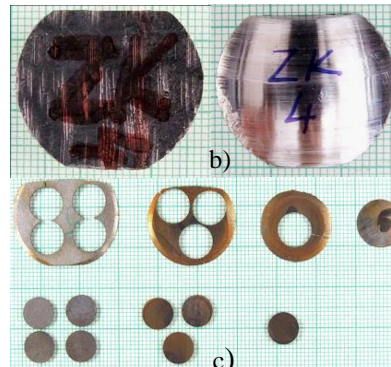
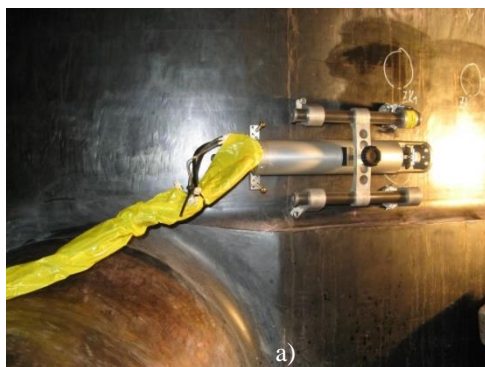
Obr. 3: Experimentálny materiál (48 x 100 x 120mm)



Obr. 4: Princíp odberu vzoriek



Obr. 5: Odberová hlavica zariadenia SSam™-2



Obr. 6: Odber vzorky v prevádzke JE Bohunice a jej rezanie a) odber, b) vzorka, c) rezanie

# ANALÝZA TEPLOTNÍCH NAPĚTÍ PLAMENCE SPALOVACÍ KOMORY A PREDIKCE ŽIVOTNOSTI

## ANALYSIS OF THERMAL STRESSES OF THE FLAME TUBE OF THE COMBUSTION CHAMBER AND LIFETIME PREDICTION

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r. o., Křenová 65, 602 00 Brno, CZ, e-mail: [vesely@ekolbrno.cz](mailto:vesely@ekolbrno.cz)

### Abstrakt

Nejvíce tepelně namáhanými částmi spalovacích turbín jsou funkční části spalovacích komor. To je dáno tím, že zde jsou z jedné strany tepelné toky sáláním z plamene na stěnu a z druhé strany jsou u vnitřní i vnější strany plamence velké konvektivní tepelné toky. Tím vzniká nerovnoměrné teplotní pole plamence, které je příčinou vzniku teplotních napětí a deformací. Všude tam, kde jsou vysoké gradienty teplot, a to jak v prostoru, tak v čase, vznikají teplotní napětí, které mohou v některých případech ohrozit provoz spalovací komory, a to především tam, kde v důsledku cyklického namáhání dojde ke kumulaci poškození a ke vzniku trhlin. Pro výpočet teploty stěny plamence bude použita zónová metoda, kde v každé zóně je řešena rovnice tepelné rovnováhy při výměně tepla mezi plamenem a stěnou, přičemž tepelný tok je dále analyzován na dalších prvcích spalovací komory. Vypočtené teploty stěny budou použity jako okrajová podmínka 1. druhu pro řešení teplotního a napětového pole plamence spalovací komory. Životnost bude určena z křivek nízkocyklové únavy pro daný materiál.

### Abstract

The most thermally stressed parts of combustion turbines are functional parts of combustion chambers. That is due to thermal radiation of the flame to the wall and substantial convection from inner and outer side of the flame tube. This creates non-uniform temperature field of the flame tube, which causes thermal stresses and deformation. Wherever there are high temperature gradients, both in space and time, temperature stresses arise. Temperature stresses may in some cases threaten the operation of combustion chamber, especially at the places where cyclic stresses cause accumulation of damage and creation of crack. A zone method will be used to calculate the flame tube wall temperature. The thermal equation equilibrium is solved in each zone while the heat is exchanged between the flame and the wall. The heat flow will be further analyzed on the other elements of combustion chamber. Calculated wall temperatures will be used as the first boundary condition for solving temperature field and stress field of the combustion chamber flame tube. The service life will be determined by the low-cycle fatigue curves based on specific material.

### Stručný popis spalovací komory a základní termodynamické parametry

Na obr. 1 je podélný řez spalovací komorou typu CAN v souproutém provedení. Turbína má celkem 11 těchto komor. Palivem je zemní plyn Tranzit s dolní výhřevností  $H_{u_i}=49\,172\text{kJkg}^{-1}$ , s hmotovým poměrem vodík-kyslík  $\sigma_H/\sigma_c = 0,3339$ , se stechiometrickým palivovým poměrem  $f_{\text{stech}} = 0,058768$ . Primární oblast je opatřena čtyřmi kruhovými hořáky 9 se šířkou stabilizátorů  $B = 16\text{ mm}$ , osy stabilizátorů jsou ve vzdálenosti  $H = 26,7\text{ mm}$ . Palivo je přivedeno otvory umístěnými v ose stabilizátorů. Plamenec je sestaven z kovových kroužků, které jsou vzájemně svařeny. Kroužky jsou chlazeny závojem chladícího vzduchu. Geometrie kovového kroužku je znázorněna na obr. 2, přičemž geometrie je definována parametrem (označení viz obr. 2)

$$M = \frac{psl}{dDL_K} = 0,467 . \quad (1)$$

## Rozdělení průtočných ploch v plamenci

Rozdělení průtočných ploch ve spalovací komoře má významný vliv na její funkci a na hlavní její charakteristiky jako je tlaková ztráta, účinnost spalování, emise  $\text{NO}_x$ , CO, dýmu, teplotní pole na výstupu. Pro tento případ bylo zvoleno rozdělení průtočných ploch podle tabulky 1, kde jsou průtočné plochy charakterizovány nepřímo lokálním součinitelem přebytku vzduchu  $\alpha$  v každé zóně.

Tabulka 1

Číslo zóny	1	2	3	4	5	6	7	8
Přebytek vzduch $\alpha$ [-]	2,22	2,23	2,25	2,27	2,27	3,8	3,8	3,8

## Postup výpočtu

Výpočet napěťového pole nejvíce namáhaného segmentu č. 5 (viz obr. 1) je rozdělen na dvě části. V prvním kroku se vypočte efektivní teplota plamene, emisivita plamene o účinnost spalování podél celého plamence zonální metodou podle algoritmu autora. Podrobnosti jsou uvedeny v [1]. Jsou přijaty tyto předpoklady řešení:

Spalovací komora je adiabatická. Sálavou energii z plamene na stěnu emituje izotermická vrstva plynu s efektivní teplotou  $T_{EFi}$ , která se počítá lokálně v každé zóně.

System plamen – stěna je ve stavu termodynamické rovnováhy a plamen a stěny lze považovat z hlediska přenosu tepla za povrchy šedé.

System je stacionární a nedochází ke změnám teploty stěn plamence v čase.

Plamen se vyznačuje pohlcovací schopností, kterou vyjadřuje integrální součinitel zeslabení záření  $K = K_{SA} + K_V$ , který globálně charakterizuje celkové vlastnosti zeslabení vrstvy plynu sazemí a tříatomovými plyny.

Je přijata koncepce ekvivalentní tloušťky sálající vrstvy plynu  $S_{ekv}$ .

Efektivní teplota plamene je funkcí vzdálenosti  $x$ , účinnosti spalování  $\eta_S$ , adiabatické teploty  $T_3$ , objemových dílů  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , sazí, parametrů vzduchu na vstupu  $T_2$ ,  $p_2$  a průměru plamence  $D_{pl}$  podle rovnice

$$T_{EF} = f \left[ x, \eta_S, T_3, T_3^{\alpha=1,0}, \omega_{\text{H}_2\text{O}}, \omega_{\text{CO}_2}, \omega_{\text{SA}}, \frac{\sigma_C}{\sigma_H}, T_2, p_2, D_{pl} \right]. \quad (2)$$

Dále je řešen prostup tepla celou spalovací komorou. Jedná se o složenou úlohu obsahující sálání z plamene na stěnu plamence, konvektivní chlazení vnitřní stěny závojem chladícího vzduchu, vedení tepla materiálem plamence, konvektivní chlazení vnější stěny plamence, sáláním vnější stěny na povrch pláště a konečně prostup tepla pláštěm a izolací. Výsledkem jsou teploty vnitřní a vnější stěny plamence přičemž tyto teploty jsou spolu s ostatními parametry uvedeny na obr. 3. Teplotní a napěťové pole segmentu č. 5 plamence je řešeno programem RELAX, který je popsán ve [3]. Přitom je použita okrajová podmínka 1. druhu. Napěťové pole segmentu je znázorněno na obr. 4, detailní napěťové pole podle HMH je na obr. 5. Materiál plamence je podle nového označení X10CrNiTi18-10 (dříve 17 246.4). Průběh teploty a ekvivalentního napětí podle HMH je na obr. 6.

## Závěr

Z rozboru teplotních napětí, která vznikají při axiální nerovnoměrnosti teplot segmentu spalovací komory chlazeného závojem chladícího vzduchu je zřejmé, že maximální hodnota napětí dosahuje kolem 1000 MPa. Z křivky nízkocyklové únavy pro čisté teplotní namáhání vyplývá, že pro dané napětí lze dosáhnout životnosti 5000 cyklů, což je vyhovující hodnota, protože jeden cyklus lze považovat za zapálení a odstavení spalovací komory. V případě, že se zvýší tep-

lotní namáhání stěny od záření a klesne zároveň teplota chladicího media, může narůst axiální teplotní gradient a může se snížit životnost s ohledem na nízkocyklovou únavu.

### Literatura:

- [1] Veselý, S. (2007): *Spalovací komory spalovacích turbin*. ISBN 80-239-6659-X  
 [2] Pospíšil, B. (1971): *Základy neizotermické pevnosti, Technická publikace*. Brno: KTU-IBZKG.  
 [3] Kolár, V., Němec, I., Kanický, V. (1977): *Principy a praxe MKP*. Computer Press.

Obr. 1: Základní geometrie spalovací komory typu CAN pro spalovací turbínu s teplotou spalin před turbinou  $t_3 = 1031 \text{ °C}$  a stlačením  $\varepsilon = 18$ . Palivo zemní plyn.

Základní parametry:

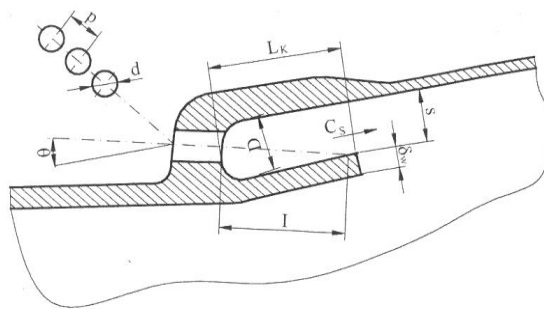
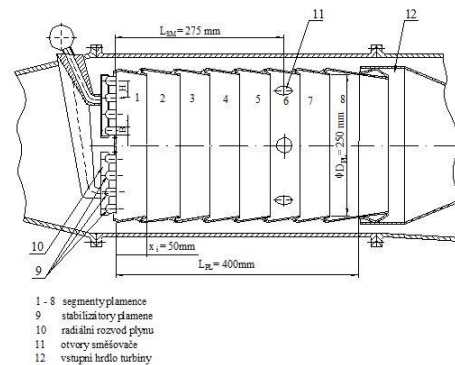
$$p_2 = 1,814 \text{ MPa};$$

$$t_2 = 421,3 \text{ °C};$$

$$t_B = 25 \text{ °C};$$

$$f_{\text{stech}} = 0,058768;$$

$$\sigma_H / \sigma_C = 0,3339; H_u = 49172 \text{ kJkg}^{-1}$$



Obr. 2: Geometrie přívodu chladicího vzduchu do kroužku při závojevém chlazení

Obr. 3: Závojevé chlazení kovaného kroužku. Výpočet charakteristických veličin po délce 5. kroužku.

$t_m$  – teplota na hranici chladicí mezní vrstvy [°C]

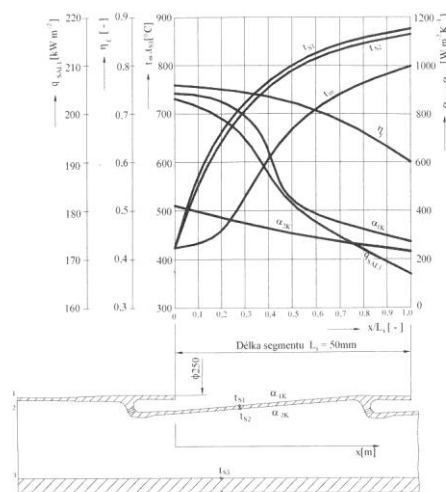
$t_{S1}$  – teplota vnitřního povrchu stěny kroužku [°C]

$\eta_f$  – účinnost chladicího filmu [-]

$\alpha_{1K}$  – součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně kroužku [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$\alpha_{2K}$  – součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně kroužku [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]

$q_{SALI}$  – měrný tepelný tok zářením z plamene na stěnu kroužku [ $\text{kWm}^{-2}$ ]





obr.4 : Ekvivalentní napětí podle Hencky-Misese-Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu.

Základní technické parametry:

teplota chladicího vzduchu:  $t_2 = 421,3^\circ\text{C}$

teplota plamene :  $t_{EF} = 1366^\circ\text{C}$

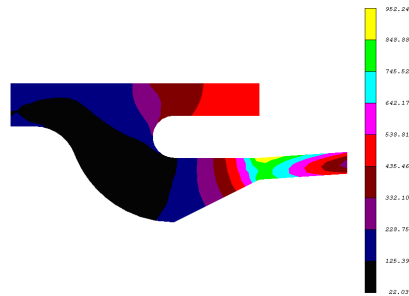
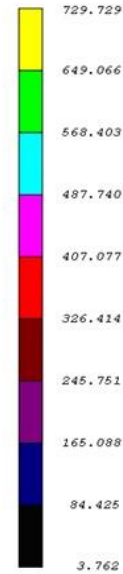
poměrný hmotnostní průtok

chladicího vzduchu :  $\delta_{CH} = \frac{\dot{m}_{CH}}{\dot{m}_2} = 0,213$

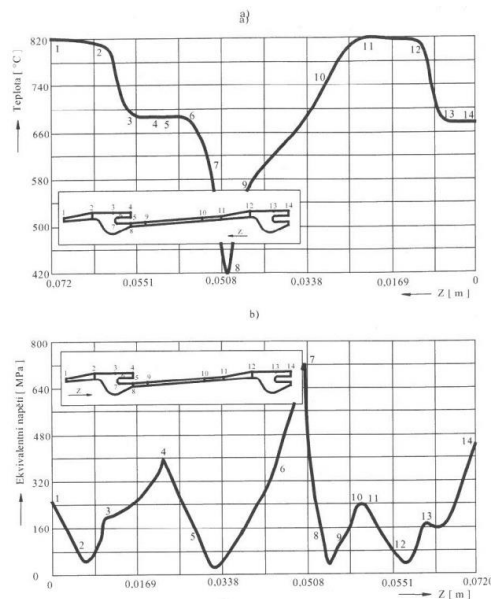
délka segmentu :  $x_i = 50 \text{ mm}$

materiál segmentu : ČSN 17 246.4

Napětí jsou uvedena v MPa.



Obr. 5: Detail pole ekvivalentního napětí podle Hencky-Misese-Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Výseč segmentu dle obr. 4. Napětí jsou uvedena v MPa.



Obr. 6: Průběh teploty (část a) a ekvivalentní napětí (část b) na vnitřní stěně plamence spalovací komory. Plamenec je chlazen závojem chladicího vzduchu.



# DOPAD VYSOKOTEPLTNÍHO PŘEHŘÁTÍ NA MIKROSTURUTURNÍ ZMĚNY DEGRADOVANÉ OCELE SUPER 304H

## MICROSTRUCTURE CHANGES CAUSED BY HIGH TEMPERATURE OVERHEATING OF DEGRADED STEEL SUPER 304H

Jakub Horváth<sup>a,b)</sup>, Michal Junek<sup>a,b)</sup>, Marie Rohlová<sup>a)</sup> a Jiří Janovec<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> ČVUT, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

<sup>b)</sup> UJP PRAHA a. s., Nad Kamínkou 1345, 156 10 Praha – Zbraslav

### Abstrakt

Příspěvek hodnotí mikrostrukturní změny v oceli SUPER 304H způsobené vysokoteplotním přehřátím (1140 °C, 15 hodin). Použitý experimentální materiál byl nejprve podroben dlouhodobé laboratorní expozici při 650 °C po dobu více než 30 000 hodin. Následně byl takto exponovaný materiál podroben vysokoteplotnímu přehřátí. Při hodnocení byla věnována hlavní pozornost mikrostrukturním změnám a precipitačním procesům. Tyto změny mají významný vliv na aplikovatelnost oceli SUPER 304H pro nadkritické bloky energetických celků. Porovnání bylo provedeno prostřednictvím barevného leptání dále pak použitím skenovací elektronové mikroskopie včetně chemických analýz. Porovnávány byly stavy laboratorně exponované a vysokoteplotně přehřáté a základní materiál bez expozice.

### Abstract

This paper documents the microstructure changes of steel SUPER 304H caused by high temperature overheating (1140 °C, 15 hours). The experimental material was firstly isothermally laboratory exposed about 30,000 hours at temperature 650 °C and then subject to high temperature overheating. Main focus was given to microstructural changes and precipitation processes. Paper summarized influence of those changes to practical applicability of steel SUPER 304H for ultra-super critical (USC) coal power plants. Base material, laboratory expose state and overheated state were compared. Combination of color etching and optical microscopy method, electron scanning microscopy and energy dispersive spectroscopy analysis was used for comparison.

### Úvod

Nárůst pracovních parametrů páry v uhelných elektrárnách (teplota a tlak) je kontinuální proces, který je velmi ovlivněn dostupnými konstrukčními materiály. Systematický nárůst pracovních parametrů je v přímé spojení s aplikací nových modifikací materiálů nebo přímo nových materiálů. Pro poslední generace nadkritických a super nadkritických bloků jsou pracovní parametry na hraně aplikovatelnosti stávajících austenitických materiálů.

Základní požadavky na austenitické materiály pro teplosměnné plochy jsou dostatečná creepová odolnost, mechanické vlastnosti, odolnost proti koroznímu napadení a exfoliaci. Ocel SUPER 304H je kategorizována jako vhodná pro tuto aplikaci [1, 2]. Tento typ materiálu je vyráběn dvěma výrobci Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation a Manesman.

Ocel SUPER 304H je komplexně legovaná austenitická žárovebná ocel typu 18/9 (18 % chromu a 9 % niklu). Legující prvky jsou dolegovány za účelem zvýšení žárovebnosti. Ocel SUPER 304H je dolegovaná 0,4 % Nb, 0,1 % N a 3,0 % Cu, obsah uhlíku je optimalizován na hodnotě 0,1 % [3]. Relativně vysoké množství přidaných legujících prvků vede k termodynamické nestabilitě této oceli. Nestabilitě ve smyslu náchylnosti k precipitaci částic v průběhu teplotní expozice materiálu.

Dle chemického složení spadá ocel SUPER 304H do kritické skupiny specifikované v [4] pro precipitaci křehké sigma fáze. Precipitace sigma fáze je tedy velmi pravděpodobná. Jejím

hlavním dopadem je prudký pokles mechanických vlastností. Výsledky publikované v [5, 6, 7] potvrzují precipitaci sigma fáze v oceli SUPER 304H během teplotní expozice.

Dopad vysokoteplotního přehřátí na sigma fázi je popsán v tomto článku.

### Experimentální část

Sigma fáze způsobuje zkřehnutí teplotně exponované ocele SUPER 304H. Pro prokázání zkřehnutí ocele byly provedeno měření absorbované energie na oceli podrobené teplotní expozici 675 °C po dobu 20 000 hodin zajišťující precipitaci sigma fáze. Měření absorbované energie bylo provedeno na 5 mm tlustých redukovaných tyčích s V vrubem. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 1 [8].

Přímé porovnání mezi snímkem z elektronové mikroskopie, změřenou mapou zastoupení obsahu chromu a snímkem z optické mikroskopie je zobrazen na obr. 1. Červenou barvou je v obr. 1 zvýrazněna částice použitá pro porovnání mezi experimentálními metodami. Na základě porovnání je možné konstatovat, že aplikaci barevného leptání je možné použít pro identifikaci sigma fáze a následně její kvantifikaci.

Rozdíl mezi exponovaným a vysokoteplotně přehřátým stavem je patrný z porovnání obr. 2 a obr. 3. Sigma fáze degradující mechanické vlastnosti precipituje na trojných styčích zrn. Hlavním rozdílem způsobeným vysokoteplotním přehřátím je rozpuštění sigma fáze na trojných styčích zrn. Trojné styky hranic zrn bez patrné přítomnosti sigma fáze ve vzorku podrobenému přibližně době expozice 3 x 10<sup>4</sup> hodin při teplotě 650 °C a následně podrobeného vysokoteplotnímu přehřátí jsou patrné na obr. 3. Rozpuštění sigma fáze by mělo odstranit nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti.

Rozlišení optického mikroskopu je v porovnání se skenovací elektronovou mikroskopií výrazně nižší, proto bylo provedeno ověření rozpuštění sigma fáze prostřednictvím SEM v kombinaci s EDS měřením. Obr. 4 ukazuje porovnání snímku z elektronové mikroskopie, kombinovanou mapu chemického složení a mapu obsahu chromu. Tato kombinace tak potvrzuje skutečné rozpuštění sigma fáze v mikrostruktuře ocele.

Vysokoteplotní přehřátí mělo i další dopad na mikrostrukturu, a to masivní zhrubnutí zrn v koloniích při vnějším povrchu trubek. Zhrublé kolonie jsou patrné na obr. 5.

### Diskuse

Měření absorbované energie ukazuje na markantní pokles mezi základním materiálem a exponovaným stavem. Pokles v měřené absorbované energii byl o 75 %. V exponovaném stavu byla prokázána precipitace sigma fáze. Díky měření chemického složení částic na lomových plochách bylo potvrzeno, že sigma fáze způsobuje jmenované zkřehnutí materiálu.

Zkřehnutí ocele SUPER 304H v důsledku její teplotní expozice bude vážným problémem pro aplikaci na nadkritických a supernadkritických blocích. Zkřehnutí může způsobit nestabilní šíření trhlin v přehřívákových plochách zapříčiněných vibracemi systému anebo praskavost materiálu při provádění opravných svarových spojů.

Vliv zkřehnutí způsobený precipitací sigma fáze může být odstraněn prostřednictvím rozpouštěcího žíhání. Obecně se sigma fáze rozpouští nad 815 °C. Tato teplota je platná pro binární systém Cr – Fe. Sigma fáze precipitující v oceli SUPER 304H obsahuje další substituční prvky, tyto prvky obecně zvyšují rozpouštěcí teplotu. Parametry použitého rozpouštěcího žíhání byly 1140 °C po dobu 15 hodin.

Aplikované žíhání vedlo k rozpuštění sigma fáze v hodnocených vzorcích. Rozpuštění sigma fáze bylo potvrzeno skrze optickou a elektronovou mikroskopii. Rozpuštění fáze by mělo odstranit zkřehnutí ocele.

Parametry použitého rozpouštěcího žíhání byly relativně vysoké, s čímž se pojí druhý dopad na mikrostrukturu, a to vznik kolonií extrémně zhrubých zrn. Zhrubnutí zrna v případě této ocele povede ovlivnění žáropevnosti a velmi pravděpodobně k akceleraci případné exfoliace.

Sigma fáze může být odstraněna aplikací rozpouštěcího žíhání. Bude však nutné minimalizovat negativní dopady tohoto žíhání jako zhrubnutí zrna. Z tohoto důvodu budou další práce zaměřeny na optimalizaci podmínek žíhání, a to jak snížením žíhací teploty, tak i optimalizace doby rozpouštěcího žíhání a následně potvrzení odstranění zkřehnutí.

## Poděkování

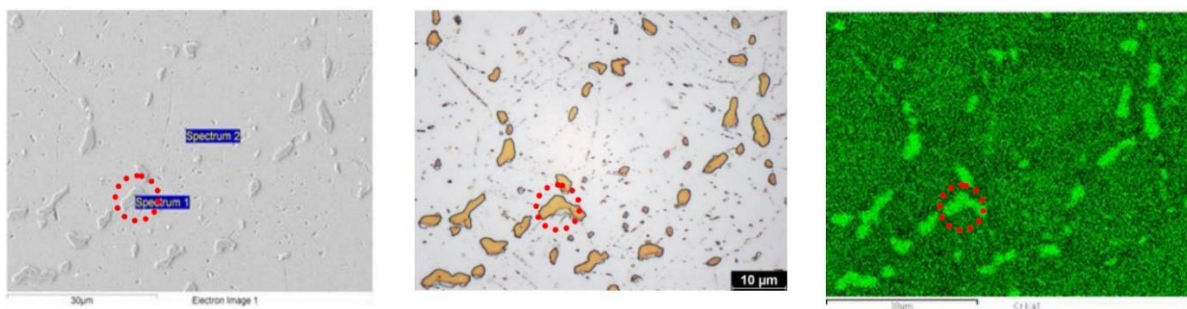
Tento příspěvek vznikl na základě výsledků získaných za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu č. TA01010181, Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu č. FR-TI3/458, Ministerstva školství tělovýchovy a sportu České republiky v rámci projektu č. LO1207, a dále podpory grantové agentury Českého vysokého učení technického v Praze v rámci projektu č. SGS 16/215/OHK2/3T/12.

## Literatura

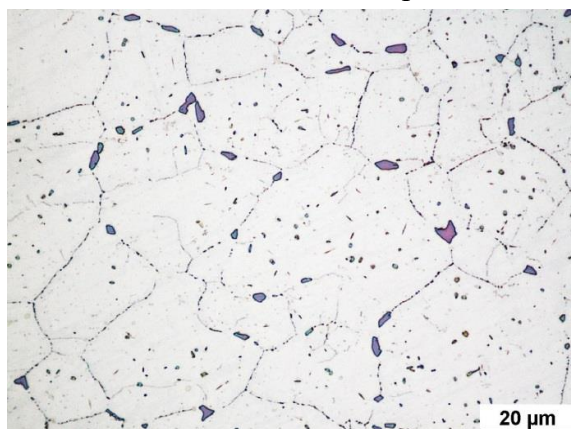
- [1] Viswanathan, R., Henrey, J.F., Tonzosh, J., Stanko, G., Shingledecker, J., Vitalis, B., Purgert, R. (2005): *U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plant*. Journal of Materials Engineering and Performance.
- [2] Wiswanathan, V., Purgert, R., Rawles, P. (2008): *Coal – fired power materials. Advanced materials and processes*.
- [3] Abe, F., Kern, T.U., Viswanathan, R. (2008): *Creep-resistant steels*. England: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.
- [4] Hsieh, C.C., Weite, W. (2012): *Overview of Intermetallic Sigma ( $\sigma$ ) Phase Precipitation in Stainless Steels*. ISRN Metallurgy.
- [5] Horváth, J. (2014): *Vliv velkých plastických deformací na vlastnosti žárovevných ocelí HR3C a SUPER 304H*. Praha.
- [6] Horváth, L., Andršová, I., Podhorná, B., Horváth, J. (2014): *Program MPO TIP „Materiálové řešení průmyslových zařízení pracujících s ultrapřehřátou parou“ Zpráva o průběhu řešení za rok 2014*. Praha.
- [7] Horváth, L., Andršová, I., Horváth, J. (2014): *Zpráva o průběhu řešení za rok 2014 Technologie ohybů trubek pro přestupní plochy přehříváků a mezipřehříváků progresivních konstrukcí kotlů*. Praha.
- [8] Horváth, J., Junek, M., Janovec, J. (2017): *The Changes in Mechanical Properties of Austenitic Creep Resistant Steels SUPER 304H and HR3C Caused by Medium-term Isothermal Ageing*. Solid State Phenomena.

Tabulka 1: Výsledky měření absorbované energie oceli SUPER 304H [8]

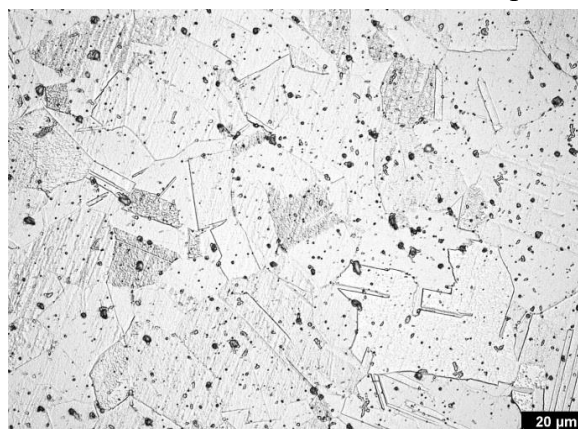
Stav	KV 300 / 5 (J)	Plošný podíl sigma fáze (%)
Před expozicí	44,7 ± 1,0	0,0
Exponovaný materiál	11,4 ± 0,4	2,6



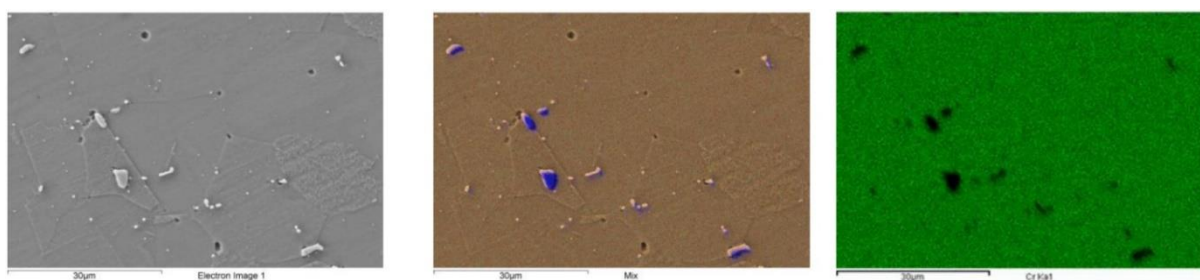
Obr. 1: Verifikace detekce přítomnosti sigma fáze ze snímku světelného mikroskopu



Obr. 2: Laboratorně exponovaný stav 650 °C /  $2.45 \times 10^4$  před přehřátím



Obr. 3: Vysokoteplotně přehřátý stav



Obr. 4: Mapy distribuce chemických prvků pro vysokoteplotně přehřátý stav



Obr. 5: Makrosnímek příčného řezu stěnou trubky

# VÝZKUM PRO UMOŽNĚNÍ BEZPEČNÉHO PROVOZU PAROVODŮ S MAKROTRHLINAMI

## RESEARCH FOR SAFE OPERATION OF STEAM PIPELINES WITH DETECTED MAKROCRACKS

Jiří Lukáš

ČEZ a.s., Technická kontrola a diagnostika KE

### Abstrakt

Příspěvek popisuje interní VaV projekt ČEZ, a. s., jehož cílem bylo získání postupu k hodnocení životnosti parovodu s výskytem trhliny a získání diagnostických postupů k monitorování jejího růstu. Jedná se o úlohu, kdy po diagnostice ohybu parovodu je zjištěna na základním materiálu ohybu mikrotrhlina nebo trhlina omezeného rozměru a je nutné posouzení možnosti provozu do doby, kdy bude zajištěn náhradní díl nebo do doby plánovaného dožití bloku.

### Abstract

The paper describes the internal CEZ R & D project, which aimed at obtaining a procedure for evaluating the life-time of the steam pipelines with crack occurrence and obtaining diagnostic procedures for its monitoring. There is presented the task when, the crack with limited size or micro-crack is detected by diagnostic in the base material of the bend of steam piping. In the case is necessary to assess of occasion of the unit operation up to a time when the spare part is ensured or the planned lifetime of the unit.

### 1. Historie řízení životnosti parovodů

V oblasti řízení životnosti parovodů došlo za posledních 20 let k významnému posunu a rozvoji výpočetních a diagnostických metod. V ČEZ, a. s. lze konstatovat tyto změny v přístupu k hodnocení provozuschopnosti parovodů:

- do roku 2000 – životnost hodnocena na základě měření tečení a hlavně odběru vzorků parovodů – pro výměnu postačuje **konstatování, že došlo k rozpadu struktury** (k té dochází minimálně v polovině životnosti),
- 2000 – 2009 – životnost hodnocena na základě **pouhého výskytu creepových kavit** při odběru replik z povrchu parovodů,
- 2009 – 2011 – připouští se výskyt kavit s hodnocením 3a dle VGB,
- 2011 – dále – připouští se výskyt kavit s hodnocením 4a – vznik mikrotrhliny je signál pro výměnu,
- během let 2011 – 2014 ČEZ a.s. realizoval VaV projekt „Mikrotrhliny“, kterým byla potvrzena možnost provozovat do zjištění mikrotrhlin.

Z hlediska hodnocení parovodů před cca 20 lety by bylo nutné parovody na všech starých OJ již vyměnit.

**V roce 2016 byl ČEZ, a.s. vyhlášen a následně realizován VaV projekt „Výzkum pro umožnění bezpečného provozu parovodů s makrotrhlinami“.**

## 2. Cíle VaV projektu „Výzkum pro umožnění bezpečného provozu parovodů s makrotrhlinami“

- a) Prodloužení provozuschopnosti parovodů při zachování přípustné míry rizika (monitorovaný provoz s makrotrhlinou), což představovalo:
  - získání odborných podkladů, které umožní vytvoření postupů pro posouzení možnosti provozu parovodů se zjištěnými makrotrhlinami na parovodech dosluhujících elektráren (pro materiál 15 128 (0.5CrMoV),
  - posouzení stavu parovodů a možnosti jejich provozu na elektrárnách, které využívají materiály nové generace (P91/P92 – retrofity elektráren Tušimice a Prunéřov, nový zdroj B6 elektrárny Ledvice a paroplyn elektrárny Počerady),
  - zefektivnění diagnostiky parovodů a optimalizace nákladů na diagnostiku.
- b) Eliminace doby neplánované odstávky, která nastává při neočekávaném výskytu makrotrhlin na parovodu.
- c) Popis postupu hodnocení životnosti parovodů vyrobených z materiálů nové generace (9 % Cr martenzitické oceli – tj. P91 a P92), které jsou použity na elektrárnách po komplexní obnově a na nových zdrojích. Získání informací o chování této skupiny materiálů.

## 3. Etapy a jejich výstupy

Etapa	Řešitel	Výstup etapy
1	ÚAM Brno	Návrh standardu pro výpočet doby provozu s definovanou trhlinou NTD – ASI – VIII – 1 – 2017.
2	MMV Ostrava	Stanovení materiálových charakteristik potřebných pro výpočet růstu defektů za podmínek odpovídajících provozním podmínkám parovodů, Makrotrhliny – Etapa 2 DA, T-83/2015.
3	Boteg	Doporučení podpořit žádost o grantový projekt zaměřený na další výzkum metody CWI. Prozatím nenasazovat metodu NEWS a CWI do provozní praxe.
4	Sobriety	Doporučení podpořit žádost o grantový projekt zaměřený na další výzkum potenciálové metody ve smyslu doporučení shrnutých v opo- nentském posudku. Prozatím nenasazovat hromadně metodu měření tečení materiálu pomocí potenciálové metody do provozní praxe.



### 3.1 Ukázka pilotního nasazení NTD-ASI-VIII-1-2017

Podle navržené metodiky NTD – ASI – VIII – 1 – 2017 byl proveden na jednom z bloků ČEZ pilotní výpočet provozní doby do roztržení parovodu náhlým lomem na parovodu z materiálu 15 128.5.

Typ trhliny	Vypočtená kritická velikost	Doba bezpečného provozu		
		ccg	ccg + fcg	shift
semi-eliptic a/c=0,5	26,09/52,18	108 400	108 170	105 940
semi-eliptic a/c=0,25	23,18/92,72	80 670	80 350	77 000
semi-eliptic a/c=0,125	21,03/168,24	63 740	63 430	60 260
semi-eliptic a/c=0,0625	19,65/314,40	53 900	53 790	51 080
semi-eliptic a/c=0,03125	18,85/603,20	48 530	48 300	45 930
Axialní prodloužená	17,93	41 960	41 760	39 840

Průběh bezrozměrného parametru růstu trhliny a FAD diagram jsou znázorněny na obr. 1 a obr. 2 [1].

### 3.2 Výstupy z materiálové etapy

V rámci 2. Etapy projektu bylo obecně šetřeno:

- Byla stanovena závislost růstu creepové trhliny na velikosti faktoru intenzity napětí  $K_1$  pro jednotlivé zkušební vzorky, které byly vystaveny různým provozním podmínkám.
- Získané materiálové vlastnosti byly porovnány s materiálovými vlastnostmi, které byly použity při výpočtech pro zkušební vzorky v provozu.
- Znalosti těchto materiálových vlastností umožňuje jejich aplikaci při výpočtech životnosti parovodů s provozovanou makrotrhlinou.

### 3.3 Ukázka dílčích prací v oblasti vývoje diagnostických metod

V rámci rozvoje metod NEWS (SSM a CWI) bylo provedeno:

- Počítačová simulace pro posouzení vlivu diagnostikovaného objemu, vlivu typu materiálu, vlivu geometrie a provozních vlivů.
- Experimentální nasazení pro měření vlivu vlnovodů a měření rozdílů nelineárních parametrů vadného a bezvadného kusu parovodu. Na nepoškozených a poškozených ohybech parovodu, byly vytvářeny umělé vady zářezy (viz obr. 3) a také bylo testováno, zda zachytí tyto metody růst nacyklované únavové trhliny (viz obr. 4) [1].

V rámci rozvoje potenciálové metody bylo provedeno:

- využití potenciálové metody pro měření tečení – výzkum vlivu kolísání teploty na měř. deformací potenciálovou metodou, srovnání měření při provozu a za odstávky, odečet a porovnání deformace intradosu a extradosu,
- vývoj software pro měření a vyhodnocení měření tečení,
- šetření změn elektrických vlastností ocelí při degradaci oceli,
- zkušební měření na vzorku s vyčerpanou creepovou životností.



- Byly stanoveny vlivy materiálových změn vlivem stárnutí na měření PM:
  - a) 3. fáze tečení,
  - b) změna měrného elektrického odporu,
  - c) vznik anizotropie,
  - d) frekvenční sweep – teoreticky možný odhad velikosti creepového poškození.
- Byly stanoveny metodické postupy a doporučení ke zvýšení citlivosti a přesnosti měření:
  - a) provedena optimalizace nízkofrekvenční ACPDb),
  - b) provedena analýza termoelektrických vlivů při měření PM.

#### 4. Stanovisko TIČR

TIČR vydal kladné stanovisko k využití výstupů z Etapy č. 1 a č. 2 v praxi. Konkrétně se jedná o:

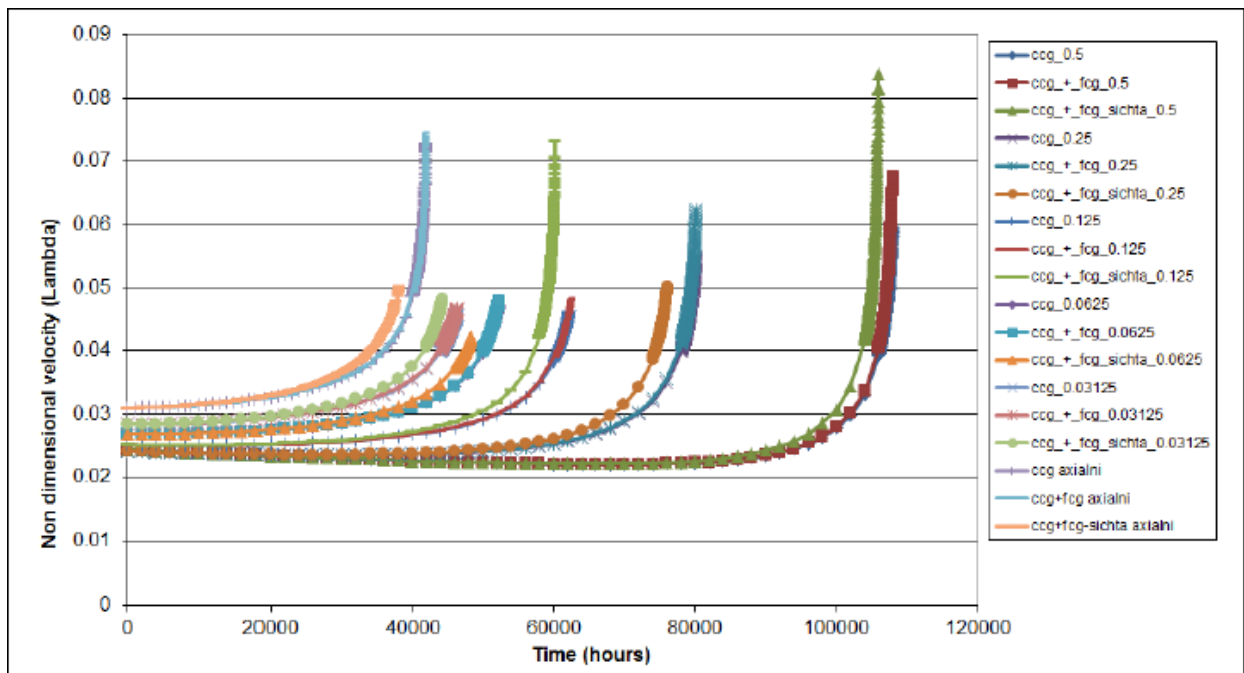
- Etapy č. 1: standard NTD – ASI – VIII – 1 – 2017, „Metodika hodnocení defektů na zařízeních pracujících při vyšších teplotách a jeho využití při výpočtu parovodů“.
- Etapy č. 2: Vývoj postupu pro určení stavu materiálu na základě vyhodnocení replik pro skupinu ocelí P 91/92, Makrotrhliny – Etapa 2 C, září 2017.
- Stanovení materiálových charakteristik potřebných pro výpočet růstu defektů za podmínek odpovídajících provozním podmínkám parovodů, Makrotrhliny – Etapa 2 DA, T-83/2015, prosinec 2015.

#### 5. Závěr

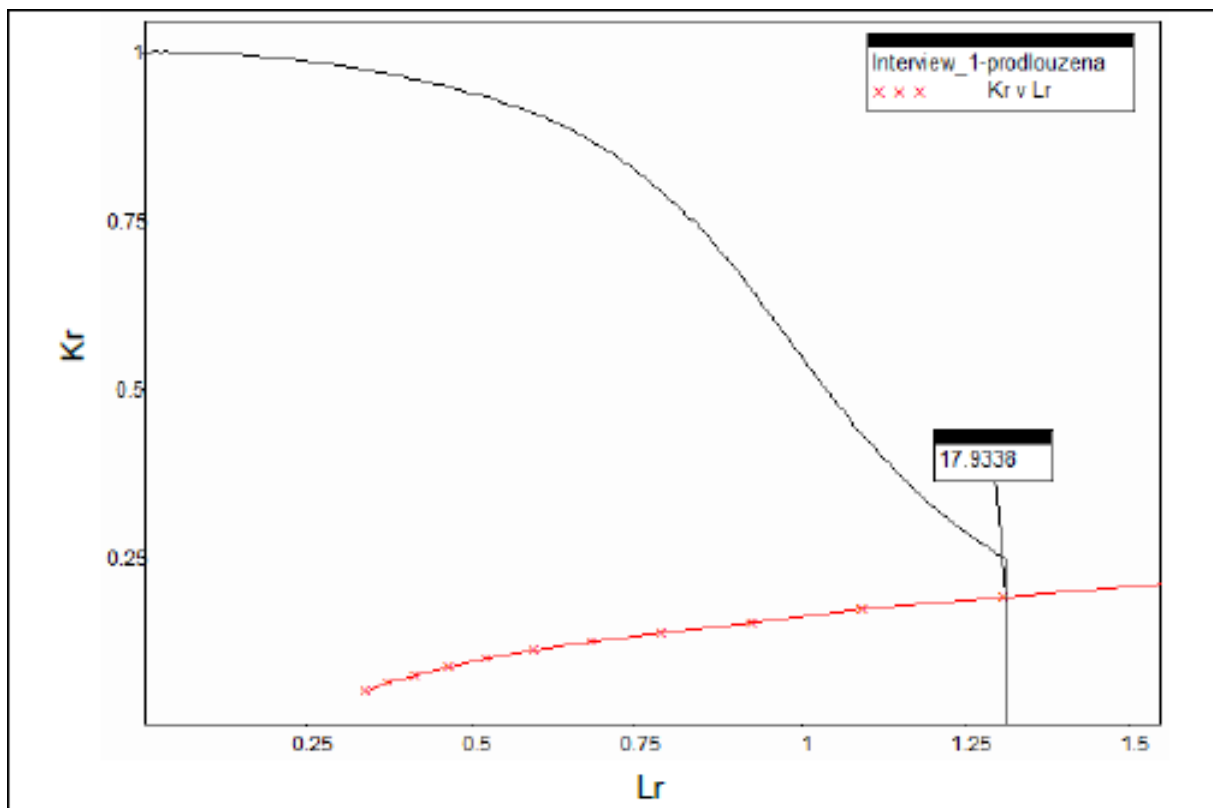
VaV projekt přinesl metodický posun v oblasti řízení životnosti parovodů, stanovení možnosti jejich provozu i v případě zjištění trhliny na parovodu. Výsledky VaV projektu jsou zpracovány do návrhu revize technického standardu Programu řízení životnosti parovodů na klasických elektrárnách v ČEZ, a. s. a jsou využívány v praxi pro řešení možnosti provozu takto dožitých dílčích částí parovodů.

#### Literatura

[1] Kolektiv řešitelů VaV projektu: *Dílčí výzkumné zprávy VaV projektu a jejich presentace.*



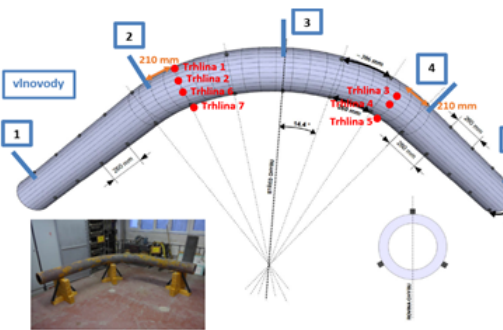
Obr. 1: Průběh bezrozměrného parametru růstu trhliny



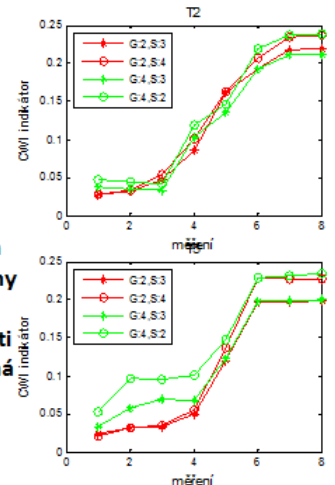
Obr. 2: Příklad zhotoveného FAD diagram pro podélnou trhlinu [1]

### 3CB - Experimentální nasazení pro měření vlivu vlnovodů a měření rozdílů nelineárních parametrů vadného a bezvadného kusu parovodu

- Srovnání materiálů 15128, P91/P92, vliv snímačů, vlnovodů, měřící místo, aparatura, měření defektních a bezvadných kusů, NEWS vs CWI výsledky (kontrolní měření)
- Odstranění nelinearity snímačů (nepomohlo k nalezení umělých náhradních vad)
- Design vlnovodů (5 dB pokles citlivosti snímače)
- Design měřícího místa
- Metalografie a NDT ejektoru (=> nevhodný pro další měření)
- NEWS metody necitlivé na vytvořené umělé náhradní vady  
=> použití upravené metody CWI (Coda Wave Interferometry)



- Umělé vruby tvořené diamantovým kotoučem
- Vzdálenost vlnovodů 180 cm
- Necitlivost na orientaci trhliny
- Obousměrně stejná citlivost
- Změna signálu o 100 % oproti výchozímu stavu jako vhodná hranice detekce trhlin od 2 mm hloubky

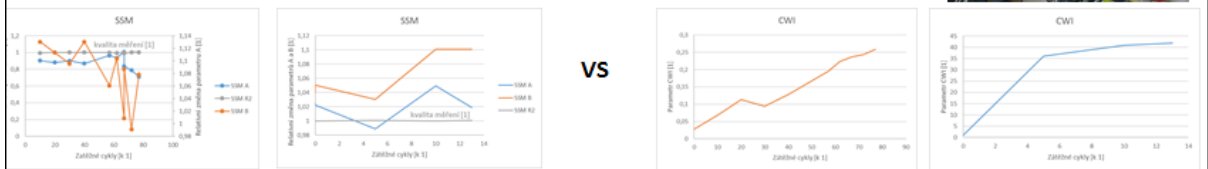


Obr. 3: Měření metodami NEWS na ohybu parovodu [1]

### 3CB - Experimentální nasazení pro měření vlivu vlnovodů a měření rozdílů nelineárních parametrů vadného a bezvadného kusu parovodu

- Srovnání materiálů 15128, P91/P92, vliv snímačů, vlnovodů, měřící místo, aparatura, měření defektních a bezvadných kusů, NEWS vs CWI výsledky (kontrolní měření)
- Odstranění nelinearity snímačů (nepomohlo k nalezení umělých náhradních vad)
- Design vlnovodů (5 dB pokles citlivosti snímače)
- Design měřícího místa
- Metalografie a NDT ejektoru (=> nevhodný pro další měření)
- NEWS metody necitlivé na vytvořené umělé náhradní vady  
=> použití upravené metody CWI (Coda Wave Interferometry)

- Změna parametru SSM B je čitelná (u tlusté desky hned s počátku vysoká), avšak modifikace CWI je citlivější řádově na růst trhlin



Obr. 4: Měření růstu trhliny pomocí metod NEWS a potenciálovou metodou při cyklickém namáhání [1]

# STABILIZACE CIRKULAČNÍCH CHLADÍCÍCH VOD NA EDU

## STABILIZATION OF OPEN COOLING WATER SYSTEM IN NPP DUKOVANY

Alena Kobzová

ÚJV Řež a.s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká Republika, tel.: +420 266 173 236

### Abstrakt

Cílem VaV projektu je analytické zpracování chemicko-technologických východisek pro dávkování činidel do doplňované přídavné vody, popř. do specifických míst propojených chladících okruhů na EDU za účelem snížení korozních jevů v potrubních rozvodech TVD a chemická stabilizace cirkulačních chladících vod, která umožní provozovat terciální okruh bez omezení v průběhu celého roku. Cílem tohoto příspěvku je rešerše za účelem volby vhodné metody stabilizace cirkulační chladicí vody na EDU.

### Abstract

The aim of this R&D project was an analytical treatment of chemical-technologist bases for agent sampling to open cooling water systems which is interconnected with essential service water systems in NPP Dukovany. The objectives are reduction of corrosion in piping of essential service water system and chemical stabilization of open cooling water system, which allow operating the open cooling water system without restriction during the whole year. This paper is background research about methodology for stabilization of open cooling circuit water system in NPP Dukovany.

## 1. Historický vývoj surové vody Mohelno-Dalešice

### 1.1 Obecné poznámky k vápenato-uhličitanové rovnováze

Jelikož na chladicí věži dochází k odpařování vody a tím i k jejímu zahušťování, dojde po určité době k překročení rozpustnosti přítomných solí a ke tvorbě vodního kamene. K posunu rovnováhy ve směru výpadku karbonátů dochází i zásluhou odvětrání volného oxidu uhličitého. Je tedy potřeba vodu v okruhu udržovat na správném zahuštění tak, aby nedocházelo k vylučování minerálních úsad na vodní straně okruhu. Toho se dosáhne neustálým odpouštěním části okruhové vody do odpadu – tzv. odluhováním systému.

Koncentrace karbonátů a vápníku obecně závisí na geologickém podloží. Koncentrace obou složek se mění v závislosti na množství atmosférických srážek, tání sněhu aj.

Vlastní výpadek karbonátů může ovlivnit řada stabilizátorů buď přírodního charakteru (humínové kyseliny), nebo látek z nejrůznějších výrob jako odpadní zvláště koloidního charakteru, nebo látek cíleně dávkovaných do chladících okruhů (stabilizátory tvrdosti, dispergátory aj.).

### 1.2 Provozní zahuštění chladicí vody a vývoj v posledních čtrnácti letech

Laboratorní zahušťovací testy jsou prováděny od roku 1990, do roku 1998 v EGÚ Praha, a. s., od roku 1999 doposud v ÚJV Řež, a. s. Na obr. 1 je uveden přehled maximálního možného provozního zahuštění z let 2003–2017 a výpadky karbonátů při zahuštění  $Z = 5$  ve stejných letech (obr. 2).

### 1.3 Důvody změn

Změny mají dvojí charakter: dlouhodobé a krátkodobé. Z obr. 1 a obr. 2 je zřejmé, že až do roku 2009 nebyly dlouhodobé změny až na několik výjimek významné a nebyly problémy se zahuštěním a výpadkem karbonátů. Změny v dalších letech vykazují trvalý nárůst  $KNK_{4,5}$  s následným nižším možným provozním zahuštěním. Důvodem je řada faktorů, z nichž některé jsou známé a očekávatelné, jiné jsou v rovině spekulativní.

Zásadní změnou v kvalitě vody je na jedné straně omezení fosfátů, které byly běžnou součástí pracích a mycích prostředků, se ale podílely na eutrofizaci povrchových vod a následnému růst řas a sinic. Na druhé straně fosfáty takto přítomné v povrchové vodě (a tedy i surové vodě pro EDU) přispívaly ke změkčování vody (vázáni vápníku) a tím napomáhaly provozu při vyšším zahuštění bez nutnosti dávkovat stabilizátor tvrdosti.

Jedním z krátkodobých parametrů, které ovlivňuje kvalitu surové vody, jsou klimatické podmínky dané lokality. Vývoj např. srážkových úhrnů během roku ilustruje graf na obr. 3, kde jsou uvedeny a znázorněny historické hodnoty v kraji Vysočina za období let 2010 až 2017 [2]. V minulosti bylo poukázáno na podobné trendy množství srážek s průběhy parametry surové vody (KNK<sub>4,5</sub>, Ca aj. [1]). Zřejmá podobnost vysvětluje známou skutečnost, že při větších srážkách klesají hodnoty koncentrací. To se zvláště uplatňuje u vodních toků s průtoky v jednotkách m<sup>3</sup>/s. Určité zpoždění odezvy, např. KNK<sub>4,5</sub>, je dáno právě kapacitou přehradních nádrží.

## 2. Metody stabilizace CChV

Mezi chemicko-technologické úpravy vody pro otevřené chladicí okruhy patří [3]:

- snižování obsahu iontu HCO<sup>3-</sup>,
- dávkování stabilizátorů tvrdosti,
- zvyšování přípustného obsahu suspendovaných látek v oběhové vodě přidáváním dispergátorů.

Tyto postupy zabráňují vylučování úsad a umožňují provozovat chladicí okruh s vyšším zahuštěním, než by tomu bylo u vody neupravované. Mezi technologie snižování hydrogenuhličitanových aniontů patří dekarbonizace srážením vápnem, dekarbonizace dávkováním kyseliny, úprava vody slabě kyselý katexem a změkčení katexem v Na<sup>+</sup> formě (odstranění iontů Ca<sup>2+</sup> a Mg<sup>2+</sup>).

Při vyšším obsahu iontu HCO<sup>3-</sup> v cirkulační chladicí vodě než 2 mval/l je možné zabránit vylučování CaCO<sub>3</sub> dávkováním stabilizátorů tvrdosti. Mezi stabilizátory tvrdosti patří anorganické polyfosforečnany a organofosforečnany. Organofosforečnany vykazují mírné korozní účinky, a proto se v přípravcích kombinují s inhibitory koroze.

Vedle stabilizátorů tvrdosti lze cirkulační chladicí vodu upravit přidáním dispergátorů. Dispergátory jsou přípravky, které suspendovaným částicím udělují souhlasný náboj a tím zabráňují jejich shlukování ve větší aglomeráty a následnému usazování v chladicím okruhu. Základní složku dispergátorů tvoří organické polyelektrolity, které mohou být anionaktivní, neionogenní, případně kationaktivní a dále pak alifatické aminy.

## 3. Výběr přípravků a postupů pro kondicionaci chladicí vody EDU

Z kapitoly 1 vyplývá, že neustále dochází ke zhoršování stavu surové vody v oblasti Dukovany. Proto bylo v průběhu let 2014-2018 vypracováno několik studií [1, 4, 5]. Vedle kyseliny sírové se jednalo o komerční prostředky, které byly navrženy jednotlivými firmami na základě poskytnutých technologických dat, klimatických podmínek oblasti Dukovany a charakterizaci surové vody.

## 4. Povolení používání přípravku pro kondicionaci CChV na EDU

Používání komerčně dodávaného přípravku pro kondicionaci CChV na EDU musí předcházet povolení jeho užívání na Povodí Moravy. Podklady pro povolení používání takového přípravku musí obsahovat mj. výsledky testů ekotoxicity a hodnocení dopadu na daný vodní útvar.

## 4.1 Testy ekotoxicity

Nad rámec informací poskytnutých v bezpečnostních listech byl pro účely zhodnocení vlivu přípravků na životní prostředí v okolí EDU sestaven komplexní test skládající se z několika zkoušek. Jednotlivé zkoušky ekotoxicity byly voleny tak, aby co nejlépe postihly lokální situaci v okolí EDU – vodní tok Skryjský potok. Cílem komplexního testu ekotoxicity nebylo určit hodnoty jako LC50, EC50 nebo ErC50 ale posoudit, zda v koncentracích doporučených výrobcem nevykazují přípravky toxické vlastnosti.

Komplexní test ekotoxicity přípravku pro zamýšlené použití sestává z:

- a) zhodnocení ekotoxicity samotného přípravku pomocí následujících zkoušek ekotoxicity:
  - akutní letální toxicity pro sladkovodní ryby, ČSN EN ISO 7346-2,
  - test inhibice pohyblivosti *Daphnia* sp., ČSN EN ISO 6341-1,
  - inhibice růstu sladkovodních řas, ČSN EN ISO 8692,
  - inhibice růstu kořene hořčice, Sinapsis Alba, Metodický pokyn MŽP, Věstník MŽP, částka 4, duben 2007.
- b) kombinovaná zkouška zhodnocení ekotoxicity přípravku s použitím cirkulační chladicí vody jako ředícího roztoku. Sada zkoušek ekotoxicity je shodná s bodem a).

Odběr a přeprava vzorků pro zkoušky ekotoxicity musí probíhat za přesně definovaných podmínek [6]. Součástí protokolů o zkouškách akutní toxicity na rybách je uvedená informace o koncentraci rozpuštěného kyslíku. Součástí protokolů o všech zkouškách ekotoxicity je informace o teplotě roztoku během zkoušek.

## 4.2 Hodnocení dopadu na vodní útvar

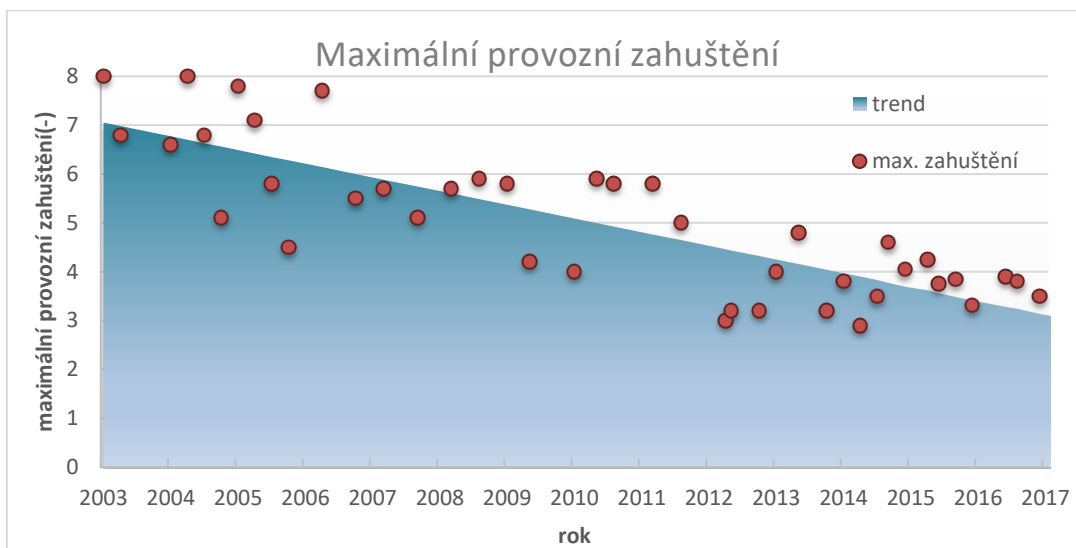
Z důvodu hodnocení dopadu metodiky ošetření CChV na ŽP musí být provedeno posouzení dopadu nové metody na limity předepsané dle n. vl. 401/2015 a n. vl. 71/2003 a na limity dle vodoprávního rozhodnutí KÚ Vysočina.

### Závěr

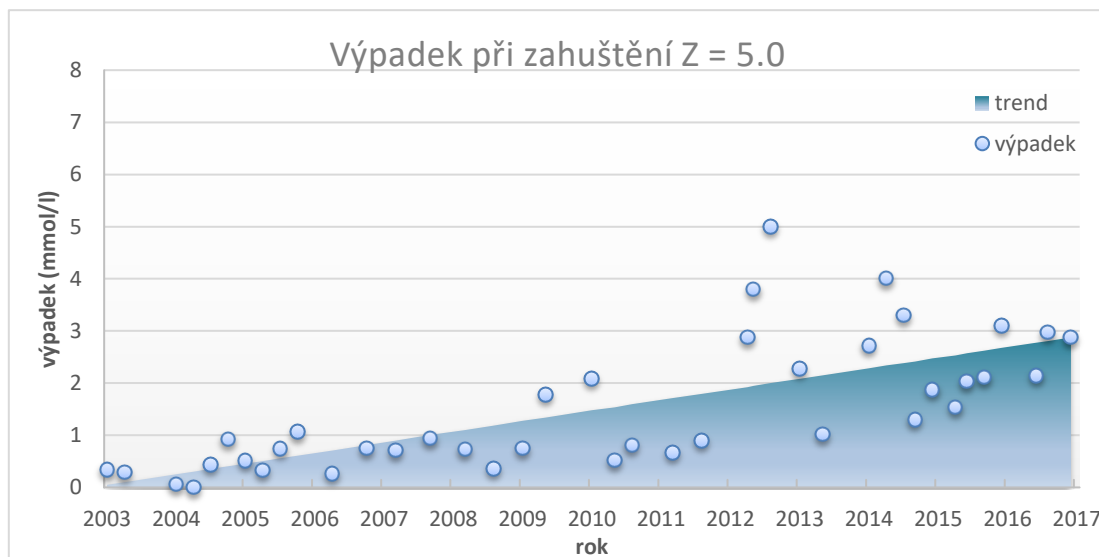
Z dlouhodobého vývoje parametrů chladicí vody na EDU je patrná nutnost zásahu do provozování okruhu cirkulační chladicí vody z důvodu zachování trvalého provozu elektrárny i v obdobích s nedostatečným zásobením surovou vodou. Na základě provedených rešerší, praktických studií i diskuzí s dodavatelem komerčních přípravků pro úpravu vody by bylo jako vhodná metoda pro ošetření chladicí vody zvoleno ošetření vody pomocí bezfosfátového stabilizátoru tvrdosti. S ohledem na posouzení ekotoxicity a dopadu na emisní limity předepsané legislativou a správními orgány ČR by mohla být tato metoda shledána jako nezávadná a proveditelná.

### Literatura

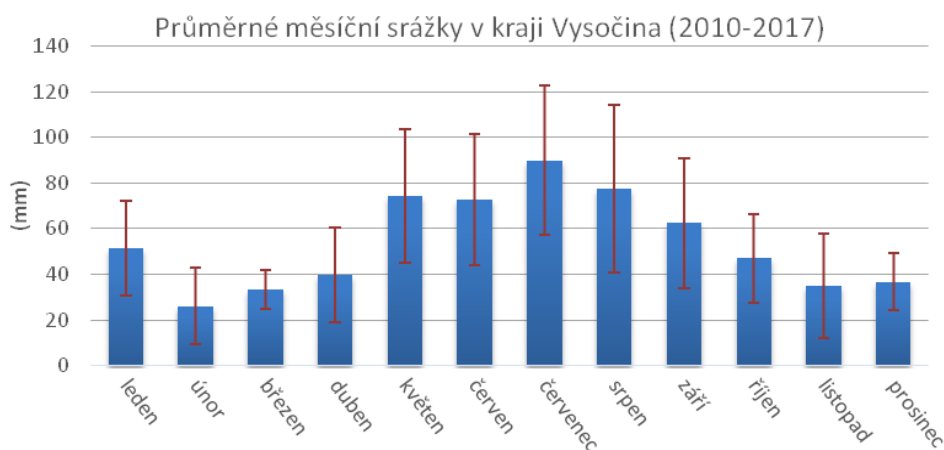
- [1] Cípra, S., Kobzová, A. (2014): DITI 2302-251 – *Srovnávací testy surové vody Dalešice-Mohelno pro NJ EDU 5*.
- [2] [www.chmu.cz](http://www.chmu.cz)
- [3] ČKD Dukla (1981): *Technická příručka pro pracovníky oboru úpravy vody*.
- [4] Kobzová, A., Kronďák, M. (2015): *DITI 2302-306 Srovnávací zahušťovací testy surové vody Dalešice-Mohelno s použitím kondicionálních prostředků pro NJZ EDU5*.
- [5] Kobzová, A., Suchanová, H. (2018): *DITI 2302-535 Zahušťovací testy surové vody EDU s dávkováním kyseliny sírové*.
- [6] Kobzová, A., Suchanová, H. (2018): *DITI 2302-546 Postup odběru vzorku CChV EDU pro testy ekotoxicity*.
- [7] <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/mohelno/>



Obr. 1: Maximální provozní zahuštění v letech 2003-2017



Obr. 2: Výpadky karbonátů v letech 2003-2017 pro zahuštění 5



Obr. 3: Úhrnné měsíční srážky v kraji Vysočina (2010-2017)



# PROJEKT VAV ČEZ, A.S. „TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI“ – HODNOCENÍ KOROZNÍCH DŮLKŮ OBĚŽNÝCH LOPATEK NT DÍLŮ PARNÍCH TURBÍN

## PROJECT OF R&D OF ČEZ A.S. “TURBINES – THE DEVELOPMENT OF A STEAM TURBINE BLADES CHECKING USING EPRI INFORMATION” – EVALUATION OF CORROSION PITS OF ROTATING BLADES OF LP PARTS OF STEAM TURBINES

Josef Kasl, Jaroslav Václavík, Matyáš Novák, Jakub Mrštík a Miroslava Matějová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

### Abstrakt

Príspevek se zabývá motivací a cíli projektu VaV ČEZ, a.s. „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“ zaměřeného na vývoj metodiky hodnocení kritické velikosti korozních důlků u oběžných lopatek NT dílů parních turbín z hlediska rozvoje únavového porušení. Projekt byl motivován opakovanými haváriemi těchto lopatek. Shrnuje výsledky dosažené v etapách zabývajících se měřením potřebných materiálových vlastností, výpočtem napětíových stavů a konstrukcí Kitagawova-Takahashiho diagramů. Pozornost je dále zaměřena na kritické oblasti jejího uplatnění.

### Abstract

The aim of this contribution is to introduce a motivation and goals of the R&D project of ČEZ, a.s. “Turbines – The Development of a Steam Turbine Blades Checking using EPRI information”, which is focused on the development of a predictive methodology of the assessment of critical size of corrosion pits on the moving steam turbine blades of low-pressure parts from the view point of the development of fatigue failure. This project was motivated by repeated failures of these blades. The paper summarizes the results obtained in the work packages, which deal with measurement of needed material parameters, computation of local blade stresses, and generation of Kitagawa-Takahashi Diagrams. The attention is focused on critical fields of its application.

### Úvod

Poměrně velký podíl vynucených prostojů bloků tepelných i jaderných elektráren mající negativní dopad na hospodárnost jejich provozu je spojen se závadami v jejich turbínách. V souvislosti s tím všechny evropské a americké firmy realizovaly rozsáhlé výzkumy příčin poškození zjištěných především v nízkotlaké (NT) části parních turbín. Jedním z nejvýznamnějších problémů je korozní napadení. Příčinou až 50 % všech poškození a havárií lopatek, disků rotorů a menších součástí průtočné části nízkotlakých (NT) dílů je hlavně korozní praskání a korozní únava. Tato poškození, rozvíjející se nejčastěji z počátečních korozních důlků, souvisí obvykle s přítomností většího množství korozně agresivních nečistot v páře, které se kumulují v povrchovém filmu na povrchu součástí během provozu nebo během odstávek v nevysušených částech turbín.

V posledních několika letech byly korozně únavové lomy iniciované z korozních důlků kořenovou příčinou havárií v několika případech 200 MW provozovaných na elektrárnách ČEZ a.s. Na základě nového členství ČEZ a.s. v programu P65 v EPRI (od roku 2014) byl získán metodický postup umožňující vyhodnocování rozvoje únavové trhliny u oběžných lopatek NT dílů parních turbín iniciovaných z korozních důlků na povrchu lopatek. Praktické využití postupu EPRI přineslo celou řadu nových aspektů, které nebyly známy a standardně zavedeny ve Skupině ČEZ a pro aplikaci postupu je bylo nutné vyřešit. Na základě těchto skutečností byl v le-

tech 2015–17 řešen projekt „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“. Jedním z jeho tří hlavních cílů je zavedení diagnostického postupu, který umožní monitorovat a vyhodnocovat vliv důlkové koroze na povrchu oběžných lopatek NT dílů parních turbín tepelných i jaderných elektráren s ohledem na potenciální rozvoj únavového poškození těchto lopatek.

Tento příspěvek se zabývá aktuálním stavem vyvíjené metodiky hodnocení korozních důlků na lopatkách parních turbín.

### Metodika EPRI hodnocení korozních důlků z hlediska vzniku únavových trhlin

Více než padesát let je známo, že mnoho havárií turbinových lopatek bylo vyvoláno mechanismem iniciace a šíření korozně-únavových trhlin z korozních důlků nacházejících se v přechodové oblasti (za Wilsonovou linií). Přes mnoho prací zaměřených do oblasti korozního pittingu a únavového porušení dosud chyběla metodika hodnocení zbytkové životnosti lopatek podrobených korozně-únavovému porušení. Tuto mezeru se snaží vyplnit postup EPRI vytvořením jasného vztahu mezi korozním důlkem a (statickým a cyklickým) napětím svázaným s iniciací únavové trhliny v korozním důlku. Mnohaletá snaha EPRI o vypracování takovéto metodiky byla soustředěna do „Programu on Technology Innovation: Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades“. Výsledky prací v oblasti korozní chemie, únavového zkoušení, lomové mechaniky a dynamiky turbinových lopatek jsou soustředěny v technických zprávách EPRI [1].

Ústřední myšlenkou pro vypracování metodiky je předpoklad, že korozní důlky vytvořené na povrchu lopatky tvoří vruby a metodami lineární lomové mechaniky je možné nalézt takové hodnoty únavových parametrů příslušného materiálu lopatky, při kterých nedochází k šíření trhliny. Předpokládá se, že stav „nešíření“ trhliny stačí charakterizovat pouze dvěma parametry, a to mezí únavy hladkých (tj. vruby neobsahujících) vzorků  $\sigma_{ac}$  případně její dvojnásobnou hodnotou  $\Delta\sigma_0$  a prahovou hodnotou rozkmitu součinitele intenzity napětí  $\Delta K_{th}$  stanovených na vzduchu při teplotě 80 °C. Celý projekt EPRI byl soustředěn na nalezení kritických hodnot navzájem svázaných dvojic: rozměr korozního důlku a cyklické napětí v místě výskytu důlku, při kterých nedojde k iniciaci resp. šíření únavové trhliny. Základem pro posouzení kritické velikosti korozního důlku je Kitagawův-Takahashiho diagram modifikovaný El Haddadem (KTHD). Diagram v souřadnicích velikost vrubu  $a$  (hloubka korozního důlku) a cyklické napětí resp. jeho rozkmit  $\Delta\sigma$  (případně reciproční parametr součinitel intenzity napětí) obsahuje dvě tzv. Kitagawovy polopřímky [2] protínající se pro hodnotu tzv. intristické velikosti  $a_0$

$$a_0 \equiv (1/\pi) \cdot (\Delta K_{th}/Y \cdot \Delta\sigma_0)^2, \quad (1)$$

kde  $Y$  je geometrický faktor. Jedna z nich je konstanta  $\Delta\sigma_0$

$$\Delta\sigma(a) = \Delta\sigma_0, \quad (2)$$

druhá je tvořena empiricky stanovenou lineární závislostí prahové hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí na velikosti vrubu (hloubky důlku):

$$\Delta\sigma(a) = (\Delta K_{th})/(Y(\pi \cdot a)^{1/2}). \quad (3)$$

Do tohoto grafu byla doplněna El Haddadem, Topperem a Smithem [3] další tzv. El Haddadova křivka, ke které Kitagawovy linie vytvářejí asymptoty.

$$\Delta\sigma(a) = (\Delta K_{th})/(Y(\pi \cdot (a+a_0))^{1/2}). \quad (4)$$

Křivky jsou materiálovými charakteristikami pro parametr napěťový poměr nesymetrie cyklu  $R$ :

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = (\sigma_m - \sigma_a)/(\sigma_m + \sigma_a), \quad (5a, 5b)$$

když se uvažuje, že zatěžování probíhá mezi dvěma konstantními úrovněmi napětí – fmaximálním  $\sigma_{\max}$  a minimálním  $\sigma_{\min}$ , které určují amplitudu napětí  $\sigma_a$  střední napětí  $\sigma_m$ .

KTHD lze rozdělit na tři oblasti oddělené těmito křivkami. Z experimentálních výsledků vyplývá, že pokud {hloubka dŮlku, rozkmit cyklického napětí v místě jeho napětí} leží v KTHD pod křivkou (4), mohou trhliny v dŮlcích iniciovat, ale neporostou; pokud obraz korozního dŮlku leží nad liniemi (2) a (3), trhliny iniciované v dŮlku budou růst; pokud obraz korozního dŮlku leží mezi těmito třemi křivkami, je možné, že se trhliny s vysokou pravděpodobností budou rozvíjet.

Z těchto výsledků vyplývá možnost stanovení napětí pro dané R, při kterém začne trhlina iniciovaná na dŮlku o hloubce  $a$  růst, případně naopak možnost určit kritickou velikost dŮlku (hloubku  $a$ ), ze kterého začne trhlina růst pro dané cyklické napětí přítomné v místě výskytu dŮlku na povrchu lopatky.

### **Konstrukce KTHD diagramů pro modely lopatek a jejich materiály v projektu VaV**

Pro zpracování a použití metodiky EPRI je třeba provést následující kroky:

a) Stanovit dva potřebné materiálové parametry zkoušené lopatky pro konstrukci KTHD. Experimentálně byly změřeny rozkmity meze únavy hladkých vzorků  $\Delta\sigma_0$  pro  $R = -1; 0,1; 0,5$  a  $0,8$  a rozkmity prahového hodnoty součinitele intenzity napětí  $\Delta K_{th}$  pro  $R = 0,1; 0,5$  a  $0,85$ . Pro výpočet meze únavy pro libovolné R byla použita aproximace pomocí Gerberovy paraboly

$$(\sigma_{ac}/R_m) = (\sigma_e/R_m) \cdot (1 - (\sigma_m/R_m)^2), \quad (6)$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti a  $\sigma_e$  je mez únavy pro  $R = -1$ . Ze vztahů (6) a (5) se stanoví hodnota  $\sigma_{ac}$  resp. její dvojnásobek pro požadované R. Hodnota prahového součinitele rozkmitu intenzity napětí  $\Delta K_{th}$  pro požadované R byla určena proložení polynomem 3. stupně.

b) Výpočtem metodou konečných prvků byla určena statické i dynamické napětí v požadovaném místě (výskytu korozního dŮlku) na povrchu lopatky. Pokud známe působící statické napětí  $\sigma_m$  a amplitudu cyklického napětí  $\sigma_a$ , je možné určit příslušný parametr R a konstruovat KTHD.

c) Na olopatkovaných rotorech byly pomocí laserového skenování nebo metodou otisků změřeny geometrické parametry korozních dŮlků hloubka  $a$  (a pološířka  $c$ ) a souřadnice jejich polohy na povrchu lopatky. Tato část je podrobně popsána v jiném příspěvku.

Pozorovaná velikost korozních dŮlků a lokální působící napětí pak může být zakresleno do diagramu a zjištěna poloha bodů vůči El Haddadově křivce. Nebezpečný dŮlek musí mít velikost nad kritickou velikostí  $a_{cr}$  určenou polohou na El Haddadově křivce.

KTHD byly zkonstruovány pro čtyři materiály, a to ocele AK 1.9 (X12Cr13); AK1TD; 1.4938 (X12CrNiMoV12-3/Böhler T552 /1.4939/X12CrNiMo12) a Böhler T671, pro lopatky řad L-0 a L-1 pro 11 modelů lopatek turbín o výkonech 200, 250, 270 a 660 MW.

### **Nejistoty v hodnocení korozních dŮlků v metodice EPRI**

V celém postupu hodnocení dispozice korozních dŮlků k rozvoji únavových trhlin existuje řada nejistot, které mohou ovlivnit spolehlivost a vypovídací schopnost metody.

Prvním problémem je skenování geometrických parametrů korozních dŮlků. Odhlédneme-li od potíží s dostupností jednotlivých lokalit na povrchu lopatek umístěných v disku rotoru, je třeba si uvědomit, že korozní dŮlky jsou většinou nepravidelného a komplikovaného tvaru a jsou často vyplněny produkty oxidace a zaneseným materiálem. U řady dŮlků tak může dojít k nepřesnému určení jeho rozměrů, zejména hloubky.

Únavové vlastnosti dané lopatkové ocele jsou určovány pro omezený počet hodnot parametru asymetrie cyklu R – v našem případě pro tři až čtyři hodnoty. Je ovšem potřeba znát tyto

parametry pro libovolné  $R$ , což vyvolává potřebu dopočítávat tyto hodnoty z regresních rovnic. Jejich přesnost bude v zásadě tím lepší, čím více experimentálních dat bude k dispozici a čím přesnější model pro závislost dané veličiny na  $R$  bude vybrán. Toto riziko lze tedy snížit zvětšením počtu provedených testů, což samozřejmě naráží na potíže časové a finanční.

Zdaleka největším problémem je pak stanovení statického a zejména dynamického napětí na lopatce v místě nalezeného korozního důlku matematickým modelováním. Bohužel nejsou známy reálné výchylky lopatek v různých stavech provozu turbíny. V případě lopatek z bloků 200 MW je uvažována koncová výchylka 1 mm, avšak bez jakékoli experimentální podpory.

Dalším problematickým bodem je stanovení geometrického faktoru  $Y$ . Všechny podrobně zdokumentované havárie lopatek NT dílů parních turbín se odehrály na blocích o výkonu 200 MW na jednom stupni na lopatkách z jednoho materiálu. Pro ně tedy jsou známy potřebná data o korozních důlcích nadkritické velikosti. Z měření korozních důlků laserovým skenováním provedených v poslední době známe i rozměry důlků podkritických velikostí. Pomocí těchto důlků lze tedy metodiku verifikovat. Fitováním byla stanovena hodnota geometrického parametru  $Y$  na 0,50 při současně lineární korekci hloubky korozního důlku na přítomnost oxidické výplně ve tvaru:

$$a_d = 0,19 \cdot a_{dzm} + 195 \text{ [}\mu\text{m]}, \quad (7)$$

kde  $a_d$  je odhadnutá „skutečná“ hloubka korozního důlku a  $a_{dzm}$  je změřená hodnota hloubky korozního důlku. Bohužel u ostatních typů lopatek a materiálů jsou k dispozici údaje o korozních důlcích jen podkritické velikosti.

## Závěry

V příspěvku je prezentován současný stav rozvoje metodiky, která poskytuje nástroj na nalezení korozních důlků, ze kterých by s velkou pravděpodobností iniciovaly únavové trhliny. Výměnou příslušných lopatek je možné zabránit výrazným škodám. V metodice je několik kritických vstupních parametrů, které mohou výrazně ovlivnit spolehlivost postupu z hlediska nalezení, resp. neurčení kritických důlků, a naopak jejich přecenění vedoucí ke zbytečným výměnám lopatek. Jedná se zejména o nejistoty výpočtů napětí, především jeho dynamické složky, a o volbu geometrického faktoru  $Y$  a korekci velikosti korozního důlku na obsah oxidů.

## Poděkování

Tato práce vznikla za podpory projektu VaV ČEZ, a.s. „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“. Autoři děkují pracovníkům Doosan Škoda Power za poskytnutí potřebných údajů o lopatkách a jejich modelů.

## Literatura

- [1] Program on Technology Innovation (2015): *Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades: AISI 403/410 (12 %Cr) and 17-4PH Blade Steels*. Palo Alto, CA: EPRI, 3002005107.
- [2] Kitagawa, H., Takahashi, S. (1976): *Applicability of Fracture Mechanics to very Small Cracks or the Cracks in the Early Stages*. Proc. of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials. Metals Park, OH: American Society for Metals, pp. 627-631.
- [3] El Haddad, M., Topper, T.H., Smith, N. (1981): *Fatigue life Prediction of Smooth and Notched specimens*. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 103, pp. 91-96.

# VAV PROJEKT: TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI, ETAPA M1 A M2

## R&D PROJECT: TURBINES – DEVELOPMENT OF BLADE CONTROL METHODOLOGY USING EPRI INFORMATION, M1 AND M2 STAGES

Vlastimil Habrčeta, Pavel Mareš, Pavel Zahrádka a Jan Patera

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

### Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá dvěma etapami projektu VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI. Cílem první etapy bylo nalezení vhodné metody pro detekci a určování rozměrů korozních důlků, které se na lopatkách parních turbín mohou vyskytovat. Tyto metody byly testovány v provozu a jejich srovnáním byl vybrán nejvhodnější přístup. Naměřená data byla následně používána jako vstup pro hodnocení kritičnosti důlků podle výpočetního modelu. Další etapa se zabývala testováním metod nedestruktivního zkoušení za účelem detekce a určení rozměrů trhlin, které mohou vzniknout z korozních důlků. Testování proběhlo jak na vzorcích lopatek s uměle vyrobenými vadami, tak i na lopatkách v provozu.

### Abstract

This paper deals with two stages of the R&D project: Turbines – development of blade control methodology using EPRI information. The aim of the first stage was to find a suitable method for detecting and determining the dimensions of the corrosion pits that may be present on the steam turbine blades. These methods were tested in service, compared and the most appropriate approach was chosen. The measured data was subsequently used as an input to evaluate the criticality of the pits according to the computational model. The next step was to test non-destructive testing methods for the purpose of detecting and determining crack dimensions that can initiate from corrosion pits. Testing was carried out both on blade samples with artificially produced defects and on blades in operation.

**Klíčová slova:** turbína, korozní důlky, 3D skenování

### Úvod

U 13% chromové oceli dochází k potížím v oblasti počátku kondenzace páry, kdy korozně-agresivní látky obsažené v páře kondenzují na povrchu lopatek za tvorby vysoce koncentrované vrstvy. Během odstávky její koncentrace dále roste vysoušením na vzduchu a okysličení zvyšuje její reaktivitu. Tato zkorodovaná oblast se stává potenciálním zdrojem korozních důlků, které po dosažení kritické velikosti mohou iniciovat únavové trhliny, šířící se přes celou tloušťku směrem k sací straně lopatky.

Pro využití posouzení růstu únavové trhliny iniciované z korozního důlku je nutné získat informace o korozních důlcích. V rámci projektu bylo provedeno porovnání diagnostických metod se zaměřením na proveditelnost diagnostik, schopnost přístupnosti, možnosti kvantifikovatelnosti korozních důlků, schopnost monitorování a archivaci dat. Následně byly vybrány optimální diagnostické metody a vyzkoušeny na lopatkách NT dílů s výskytem důlkové koroze tak, aby se metody prakticky ověřily a bylo vytvořeno porovnání metod dle jejich parametrů.

### Etapa M1 – monitoring korozních důlků

Etapa byla rozdělena na 4 podetapy:

1. srovnání možností dostupných metod pro detekci a monitorování korozních důlků,
2. výběr a odzkoušení vhodných metod,
3. metalografické ověření charakteristik korozních důlků,

4. vypracování metody pro monitoring korozních důlků včetně způsobu vyhodnocení a kritérií.

**Podetapa 1** popisuje praktické zkušenosti s šesti typy zařízení a replikací povrchu. Hodnocení zařízení je založeno na zkušenostech získaných před i v průběhu práce na této podetapě, kdy byla jednotlivá zařízení podrobena zkouškám, a byly odhaleny jejich zásadní přednosti a nedostatky.

Nejvhodnějšími přístroji pro aplikaci měření důlků na lopatkách v provozu se ukázaly být ramenové laserové skenery. Sběr dat je vhodné doplnit snímáním replik, které zaručí vyhodnocení obtížně dostupných ploch. EPRI bylo rovněž kontaktováno s dotazem na doporučení vhodné technologie. Dle vlastních slov nezná žádnou technologii navrženou pro měření důlků v provozu a doporučilo snímat repliky z povrchu lopatek a následně je vyhodnocovat pomocí mikroskopu.

**Podetapa 2** obsahuje popis použitých metod měření, výsledky jednotlivých měření na elektrárnách EPČ, ELE, ECH, EPO, porovnání naměřených výsledků testovaných technologií a finální výběr vhodných metod. Bylo uskutečněno měření ramenovým laserovým skenerem a laserovým skenerem s optickým trackerem, které byly vybrány na základě výsledků podetapy E1 etapy M1 jako nejvhodnější technologie pro měření důlků na lopatkách v provozu. Měření těmito přístroji byla doplněna replikami, které byly použity pro obtížně dostupné povrchy.

Na základě provedených měření a současných znalostí lze konstatovat, že lopatky rotorů při odstávce je nutné skenovat ramenovým laserovým skenerem; nezbytná technologická operace přípravy povrchu je tryskání povrchu a uložení rotoru ve stojanu umožňující jeho otáčení.

**Podetapa 3** zahrnuje analýzu geometrie a rozměrů vybraných korozních důlků světelnou mikroskopií, současně se zaměřuje zejména na analýzu rozměrů a chemického složení korozních produktů ve vybraných důlcích technikou skenovací elektronové mikroskopie. Mimo analýzu vybraných důlků popisuje také korozní produkty detekované mimo důlky a výskyt trhlin v mikrostruktúře. Výsledky slouží jako komparační metoda pro ověření přesnosti měření pomocí 3D skenování.

Na dvou lopatkách byly určeny oblasti vhodné pro analýzu, kde byly provedeny příčné řezy a připraveny metalografické výbrusy. Přibližné rozměry vybraných důlků měřené pomocí světelné mikroskopie byly řádově ve stovkách  $\mu\text{m}$  (průměr  $\sim 300$  až  $700 \mu\text{m}$ , hloubka  $\sim 100$  až  $300 \mu\text{m}$ ).

Analýza byla v roce 2017 rozšířena o 32 vzorků z lopatek elektráren Dětmárovice a Chvalčice. Výsledky metalografického hodnocení byly využity k hodnocení charakteru korozního napadení jednotlivých lopatek a současně k porovnání s výsledky 3D měření.

**Podetapa 4** shrnuje data z měření a předchozích podetap do dvou základních dokumentů pro případný proces kvalifikace metodiky. Výsledkem podetapy je inspekční postup a návrh metodiky samotné kvalifikace. Metodika byla testována na předposlední řadě NT lopatek 200 MW parní turbíny. Metodika obsahuje požadavky na nedestruktivní zkoušení, postup měření, vyhodnocení skenování a požadavky na kvalifikaci personálu. Důležitým poznatkem zahrnutým do metodiky je předpoklad přípravy rotoru:

Před každým skenováním se kritická oblast lopatek očistí od nečistot a prachu. Očištění probíhá ideálně proudem vzduchu, méně vhodné je čištění hadrem či obdobnými materiály, které mohou zanechávat zbytky látky. Kvůli možným nežádoucím nánosům je nutno povrch tryskat, aby došlo k očištění povrchu od korozních produktů. Případnou úpravu povrchu zajistí provozovatel dle svého uvážení tak, aby bylo zajištěno úplné odkrytí korozních důlků. Pro kompletní naskenování všech lopatek dané řady je nutné umístit rotor do stojanu umožňující jeho otáčení. V případě statického uložení rotoru není možné naskenovat 100 procent lopatek dané řady.

## Etapa M2 – NDT ke zjištění trhlin

Etapa M2 byla rozdělena na 2 podetapy. Podetapa E1 se zabývala zjištěním současného stavu provádění nedestruktivních kontrol NT lopatek parních turbín, posouzením těchto metod a návrhem na zlepšení zkoušení za účelem detekce a zjištění velikosti vad na celém listu lopatky. Cílem podetapy E2 bylo vytvoření inspekčního postupu, který je zaměřen na lopatky předposlední řady a poslední řady NT dílů parních turbín. Lze jej ale aplikovat i na lopatky podobného tvaru a rozměrů jiných typů turbín. Ze zjištěných skutečností vyplývá následující postup pro měření lopatek:

Nejprve provést „prvotní screening“ metodou vířivých proudů s využitím flexibilní sondy. Toto měření provést ve dvou krocích z každé strany. Nejprve provést měření části blízko odtokové hrany, kde se průřez lopatky příliš nemění a poté provést měření na zbývající části lopatky. Doporučuje se využít sondu o frekvenci 250 kHz a např. přístroj Ectane 2 od firmy Eddyfi, který byl využit i při testování. Jako další krok provést měření magneto-práškovou metodou za použití jha podle postupu, tak jak se tato metoda aplikuje v současné době při provozních kontrolách. Použití dalších metod se doporučuje pouze v případě indikace necelistvosti pro ověření předchozích metod a zpřesnění interpretace dané indikace, tzn. ověření detekce a délky indikace ultrazvukovými povrchovými vlnami a kapilární metodou. Pokud indikace komunikuje s povrchem pouze na jedné straně lopatky, tak se provede určení její hloubky technikou phased array.

Dalším cílem podetapy E2 bylo vytvoření obecného popisu principů kvalifikací a postupu konkrétní kvalifikace NDT metodiky ke zjištění trhlin lopatek v NT dílech parních turbín. Tento postup kvalifikace byl vypracován v souladu s dokumentem „Evropská metodologie pro kvalifikační dokumenty (třetí vydání)“.

V průběhu projektu se naskytl možnost otestování metody zkoušení metodou vířivých proudů na NT lopatkách přímo v provozu. Při tomto měření bylo detekováno několik reálných trhlin a ověřena použitelnost metody v praxi. Rovněž byla možnost otestování všech navržených metod na trhlínách, které byly vytvořeny kmitáním v demontovaných lopatkách. Výsledky z těchto měření potvrdily použitelnost metod i na realistických trhlínách.

## Závěr

Projekt umožnil vytvoření efektivní NDT metodiky hodnocení lopatek NT dílů rotorů parních turbín. Tento postup nyní umožňuje během odstávek poskytnout klíčová data pro hodnocení, pomocí analytických nástrojů a výpočtových modelů vytvořených v dalších etapách projektu, zbytkovou životnost rotorů a významně tak přispět k přesnější evaluaci zda turbínu dále provozovat, či přistoupit k její preventivní opravě.

Tento postup bude zanesen do plánu řízeného stárnutí turbín ČEZ a umožní tak snižovat náklady spojené s haváriemi v dlouhodobém horizontu, či přímo předcházet těmto haváriím.

Během projektu bylo identifikováno několik dalších procesů materiálové degradace, či vzniku trhlin, které prozatím nebyli popsány a dostatečně identifikovány a u kterých hrozí, že přispějí ke zrychlené degradaci strojů. Tyto problémy budou proto podrobněji řešeny ve spolupráci CVŘ a VZÚ v rámci další spolupráce, například v rámci programu TACR: Národní centra kompetence 1, segment Energetika.

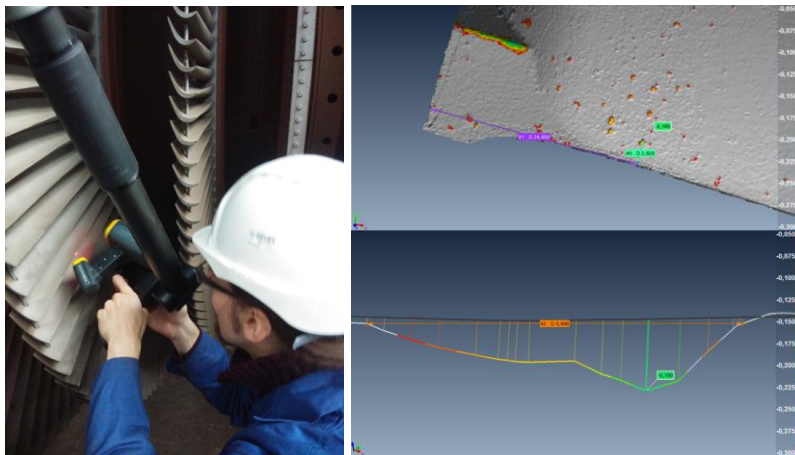
## Literatura

- [1] Patera, J., Zahrádka, P., Matějček, J., Habrcetl, V. (2017): *Inspekční postup měření důlkové koroze na oběžných lopatkách*. Rež: Centrum výzkumu Řež.
- [2] Patera, J., Zahrádka, P. (2016): *Corrosion Pitting on Low-Pressure Turbine Blades*. 12th International Conference on Non Destructive Evaluation in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components.

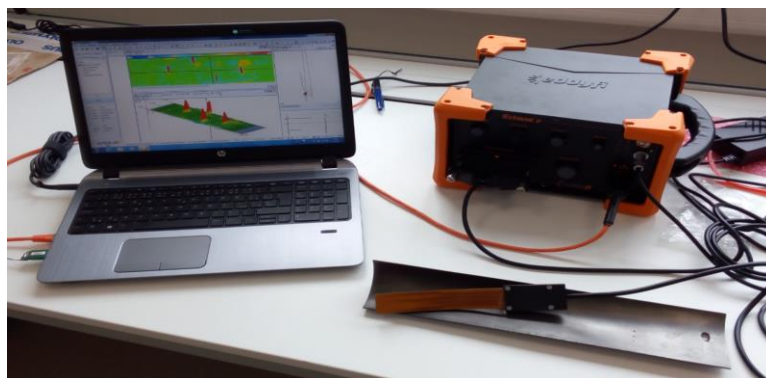


## Poděkování

Prezentované 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.



Obr. 1: Měření olopatkového rotoru s výsledky



Obr. 2: Aparatura pro měření lopatek ECT

# V&V PROJEKT: TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI,

## ETAPA M5 – CHEMICKÉ REŽIMY A NÁNOSY

### R&D PROJECT: TURBINES – DEVELOPMENT OF PROCEDURES FOR BLADE DEGRADATION MANAGEMENT BY USING EPRI GUIDELINES

#### WP M5 – WATER CHEMISTRY AND DEPOSITS

Alena Kobzová a Martin Krondřák

ÚJV Řež a.s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká Republika, tel.: +420 266 173 236,  
e-mail: [Alena.Kobzova@ujv.cz](mailto:Alena.Kobzova@ujv.cz)

#### Abstrakt

V této části projektu byly hodnoceny chemické režimy v klasických elektrárnách skupiny ČEZ a způsoby hodnocení nánosů vzniklých na lopatkách s cílem minimalizovat vznik a rozvoj důlkové koroze. Projekt zahrnoval shrnutí přínosných informací a doporučení EPRI pro chemické režimy provozních i přechodových stavů parovodního a paroplynového cyklu elektráren ČEZu, hodnocení provozních a laboratorních dat chemických režimů jednotlivých elektráren ČEZu, doporučení na doplnění instrumentace pro on-line monitoring chemických parametrů parovodního a paroplynového okruhu, shrnutí doporučení pro odběr a analýzu nánosů dle EPRI a vytvoření metodiky pro odběr a analýzu do PŘS a vytvoření kritérií a metodiky pro hodnocení odebraných nánosů včetně protokolu vstupujícího do LTOs.

#### Abstract

Work package M5 focused on chemical treatment in fossil plants of ČEZ company and evaluation of deposit on the blade surface with the aim to minimize initiation and development of pitting. Useful information and recommendations of EPRI for water chemistry of operation and non-operation conditions were summarized in this project. It was performed for fossil plant and for Combined Cycle/Heat Recovery Steam Generators (HRSGs) of ČEZ company. Evaluation of operational condition and laboratory data of water treatments for particular plant of ČEZ was performed. We recommended to complete the instrumentation for on-line monitoring of water treatment for fossil plant and for HRSGs too. The procedures for deposit sampling, analysis by EPRI recommendation, definition of criteria and methodology for deposit evaluation and the protocol guide for LTOs (long-term operation) system were defined.

#### Úvod

Část projektu zabývající se hodnocením chemických režimů a nánosů na lopatkách turbín se dělil na několik částí dle následujícího schématu:

##### **Etapa M5A:** Hodnocení chemického režimu za provozu a v přechodových stavech

- E1 – Přínosy z výzkumu EPRI a jejich možná aplikace v ČEZ, vč. přehodnocení standardu chemických režimů parovodního a paroplynového okruhu
- E2 – Definování a klasifikace rizik pro jednotlivé chemické režimy a parovodní okruhy
- E3 – Hodnocení provozních a laboratorních dat chemických režimů jednotlivých elektráren
- E4 – Doporučení způsobu provozu a odstavení TG

### **Etapa M5B: Vzorky nánosů**

E1 – Porovnání výsledků z analýz nánosů odebraných z nízkotlakých rotorů parních turbín

E2 – Systém vyhodnocení odebraných vzorků nánosů

Cílem etapy M5A projektu bylo popsat současné chemické režimy a monitoring v klasických a paroplynových elektrárnách skupiny ČEZ a navrhnout optimalizaci provozních podmínek z hlediska minimalizace vzniku a rozvoje důlkové koroze. Cílem etapy M5B bylo vytvoření postupu odběru, analýzy a metodiky vyhodnocení turbínových nánosů a vytvoření protokolu do LTOs.

Chemický režim v parovodním okruhu má vliv na efektivitu výroby a životnost zařízení. Řízení a kontrola chemického režimu parovodního cyklu je jedním z důležitých faktorů zajišťujících optimální provoz. Optimální chemický režim si klade za cíle:

- minimalizace poškození teplosměnných trubek,
- žádné problémy na turbíně (lopatky, disky, úsady),
- minimalizace výskytu tokem urychlené koroze (FAC),
- optimalizovat neprovozní stavy (najíždění, odstavování, konzervace).

Existují různá doporučení na řízení chemického režimu: EPRI guidelines, VGB normy, doporučení výrobcí jednotlivých komponent, lokální standardy a provozní instrukce.

### **Technicko-normativní dokument**

Technicko-normativní dokument pro chemický režim parovodního a paroplynového cyklu obsahuje kapitoly týkající se:

- specifikace konstrukčního uspořádání parovodního (paroplynového) cyklu,
- degradační mechanismy,
- chemické režimy,
- základní chemické parametry pro parovodní (paroplynový) cyklus,
- provozní hodnoty a akční úrovně pro parovodní (paroplynový) cyklus,
- cíle EPRI – chemický režim parovodního (paroplynového) cyklu,
- filozofie EPRI doporučení pro chemický režim parovodního (paroplynového) cyklu,
- definování a klasifikace rizik pro bloky KE ČEZ.

Mezi faktory ovlivňující optimální provoz patří:

- konstrukční řešení,
- konstrukční materiál,
- kvalita napájecí a doplňovací vody,
- volba chemického režimu,
- způsob provozování.

Cílem optimálního chemického režimu je:

- snížení koroze na minimum,
- maximalizace účinnosti kotle (minimalizovat tvorbu nánosů),
- maximální výkon turbíny (minimalizovat tvorbu nánosů),
- snížení nákladů na údržbu a opravy (bezporuchovost a bezpečnost),
- prodloužení životnosti.

Podstatou pro zjištění, co se děje v parovodním (paroplynovém) okruhu je monitoring chemických parametrů ve specifikovaných vzorkovacích lokalitách. On-line monitoring umožňuje řízení chemického režimu (např. dávkování alkalizačních činidel atd.) a okamžitou indikaci neprovozních hodnot parametru a její lokalitu.

## Monitorované parametry

Podstatou zajištění kvalitního chemického režimu je jeho monitorování – rozsah, řízení a kvalita. Každý monitorující parametr má svůj význam z hlediska korozních dějů v parovodním okruhu.

Jsou definovány dvě hlavní skupiny základních parametrů:

- limity parametrů kotlové vody (pro bubnové kotle),
- limity parametrů páry (pro bubnové i průtlačné kotle).

Limity kotlové vody minimalizují korozi a vznik nánosů v kotli. Limity parametrů v páře minimalizují vliv koroze a vzniku nánosů v parní části, především na turbíně.

Dalším kritériem pro rozdělení parametrů je jejich využití pro řízení chemického režimu – řídicí a diagnostické parametry.

Řídicí parametry zahrnují požadované minimum pro dosažení optimální chemické kontroly. Všechny jsou měřeny on-line (pH, katexovaná vodivost, odplyněná katexovaná vodivost, specifická vodivost, rozpuštěný kyslík, sodík, křemík) s výjimkou pro monitorování přenosu železa, přestřiku u bubnových kotlů a obsah chloridů. Tyto parametry jsou stanovovány periodicky laboratorně.

Diagnostické parametry slouží k odhalení problémů při provozu nebo jsou důležité při neprovozních stavech (najíždění, odstavování, cyklování atd.).

Pro provoz jsou definovány akční linie, udávající požadované hodnoty při standardním provozu (obvykle značené N) a linie AL1-4 udávající hodnoty, při kterých je nezbytné provést určitá opatření až do odstavení bloku do opravy. Hodnoty se v jednotlivých normách mírně liší.

## Vzorkovací místa

Vzorkovací místa parovodního (paroplynového) cyklu jsou dle doporučení EPRI následující:

- vstup do ekonomizéru (napájecí voda),
- kotlová voda (u bubnových kotlů),
- přehřátá/nasycená pára,
- výstup na doplňovací vodě,
- výstup z odplyňovaku,
- výtlač kondenzátních čerpadel,
- výstup BÚK (bloková úpravna kondenzátu).

## Nánosy

Další etapa projektu VaV: Lopatky turbín byla zaměřena na způsob odběru nánosů na lopátkách, jejich analýze a zpracování a vyhodnocení výsledků. Byl porovnán současný způsob odběru nánosů vzorků úsad s doporučením EPRI a vytvořen postup odběru. Dále byla provedena revize analýzy daného vzorku úsad dle doporučení EPRI [5].

Na základě dosavadních výsledků analýz odebraných úsad z KE ČEZu, které jsou prováděny na VŠCHT Praha byla ve spolupráci s nimi nadefinována kritéria pro hodnocení složení nánosů z hlediska:

- obsahu aktivátorů a inhibitorů pittingu (chloridy, sírany, uhličitany...)
- jejich vzájemného vlivu,
- vlivu chemie nánosů deponovaných na ST na pitting na NT díle.

Tato kritéria byla porovnána s kritérii EPRI. Kritéria i metodika byla vytvořena ve formátu PŘS včetně protokolu vstupujícího do aplikace LTOs. Tyto protokoly byly zpracovány pro 18 rotorů KE ČEZu.

## Doporučení z hlediska minimalizace bodové koroze na lopatkách turbín

- iniciátory bodové koroze jsou chloridové a síranové ionty,
- minimalizace vzniku bodové koroze za provozu lze dosáhnout vysokou čistotou páry, napájecí a doplňovací vody (min. obsah Cl a SO<sub>4</sub>), požadovaná hodnota katexované vodivosti v páře je 0,06 mS/cm, který je z hlediska obsahu chloridů a síranů jakožto iniciátorů pitting málo konzervativní → periodické měření jejich obsahu a konzervativnější volba limitu katexované vodivosti,
- z pohledu rizika vzniku důlkové koroze jako prvotní příčiny poruch a lomů na lopatkách turbín jsou kritickými faktory čistota páry za provozu a dodržení podmínek zamezující iniciaci důlků v offline režimu, kdy je třeba dodržet limit na vlhkost prostředí do 35 % a zamezit přístupu kyslíku, tzn. během odstávky používat odvlhčený vzduch,
- doplnit instrumentaci pro on-line měření, periodická měření dle doporučení EPRI, za účelem zajistit kompletní informaci o chemickém režimu,

## Závěrečná doporučení

- vypracovat pro jednotlivé KE detailní a přesné schéma daného chemického režimu,
- doplnit instrumentaci pro on-line a periodická měření dle doporučení EPRI za účelem zajistit kompletní informaci o chemickém režimu (s cílem na parametry ovlivňující bodovou korozi – chloridy, sírany),
- zajistit kontrolu a údržbu on-line monitorovacího systému,
- v případě, že není zajištěno monitorování chemie dle doporučení EPRI v základním rozsahu, je třeba navýšit četnost revizí turbíny, tj. zkrátit interval 12 let mezi RPČT u kritických částí,
- při každém otevření TG provádět odběry a analýzy úsad dle předpisu, výsledky doplňovat do LTOs a v případě nevyhovujícího hodnocení zaujmout doporučená opatření,
- dodefinovat do TST podmínky pro najíždění, odstavení a postup suché konzervace pro turbínu.

## Reference

- [1] Kobzová A. (2017): *Projekt VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontrol lopatek s využitím informací z EPRI, Etapa M5A – Hodnocení chemického režimu za provozu a v přechodových stavech, Podetapa E2 – Definování a klasifikace rizik pro jednotlivé chemické režimy a parovodní okruhy*, technicko-normativní dokument, ÚJV-DITI2302/426rev.1.
- [2] Kronďák M. (2017): *Chemický režim paroplynového cyklu PPČ – doporučení*, technicko-normativní dokument, ÚJV-DITI2302/435rev.1.
- [3] Kobzová A. (2017): *Projekt VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontrol lopatek s využitím informací z EPRI, Etapa M5A – Hodnocení chemického režimu za provozu a v přechodových stavech, Podetapa E3 – Hodnocení provozních a laboratorních dat chemických režimů jednotlivých elektráren*, technická zpráva, ÚJV-DITI2302/427rev.1.
- [4] Kobzová A. (2017): *Projekt VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontrol lopatek s využitím informací z EPRI, Etapa M5A – Hodnocení chemického režimu za provozu a v přechodových stavech, Podetapa E4 – Doporučení způsobu provozu a odstavení TG*, technická zpráva, ÚJV-DITI2302/428rev.1.
- [5] Kobzová A., Suchanová H. (2017): *Projekt VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontrol lopatek s využitím informací z EPRI, Etapa M5B – Vzorky nánosů, Podetapa E2 – Systém vyhodnocení odebraných vzorků nánosů*, technická zpráva, ÚJV-DITI2302/429rev.1.

# ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU II

## ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING II

Pavel Polach<sup>a)</sup>, Josef Černý<sup>b)</sup> a Šárka Houdková<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

<sup>b)</sup> ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov

### Abstrakt

V příspěvku jsou stručně představeny dva vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ dosažené v roce 2017: vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace.

### Abstract

The paper presents in brief two selected results of the Competence Centre Project of Technology Agency of the Czech Republic “Centre of research and experimental development of reliable energy production” achieved in 2017: developed equipment and methods for contactless magnetic inspection of turbine blades and summary of mechanical and corrosive properties of optimized thermally-sprayed coatings determined for high-temperature applications.

### Úvod

Řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1], [2] (v rámci programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky) bylo zahájeno v roce 2012 a bude dokončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu je přispět prostřednictvím aplikací výsledků výzkumu a vývoje nových technologií a materiálů ke dlouhodobému zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie.

Řešitelskými pracovišti jsou Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (příjemce projektu), ČEZ, a. s., Doosan Škoda Power s.r.o., Západočeská univerzita v Plzni, České vysoké učení technické v Praze, MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., TES s.r.o. a ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov. Aktualizovaná odborná náplň, podle které je řešen projekt od roku 2016, byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách ve stejném roce [2]. Vybrané výsledky řešení projektu dosažené v roce 2016 byly prezentovány na 12. ročníku této konference v roce následujícím [3].

V roce 2017 mělo být (a bylo) dosaženo při řešení projektu celkem 9 odborných výsledků:

1. laboratorní odzkoušení kontrolního systému trubek tepelných výměníků,
2. metodika a programové moduly pro analýzu proudění a přenosu tepla, simulace tepelného zatížení částí vysokotlakého dílu parní turbíny,
3. certifikovaná metodika pro stanovení J-R křivek konstrukčních materiálů z výsledků penetračního testu,
4. výpočetní model interakce lopatky s proudící tekutinou s dynamickou odezvou,
5. vyhodnocení nejvhodnějšího referenčního povlaku pro termovizní měření za zvýšených teplot,
6. shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace,

7. metodika optimalizace spolehlivosti a životnosti turbín a dalších klíčových zařízení v energetice,
8. prototyp referenčního termografického povlaku pro přesné bezkontaktní měření povrchové teploty objektů pomocí termovizních kamer,
9. komplexní výpočetní model (založený na metodě konečných prvků) pro stanovení dynamických vlastností rotorových soustav parních turbín.

V tomto příspěvku jsou stručně představeny dva výsledky řešení projektu: vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace.

### **Vývoj zařízení a metodiky pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek**

V rámci řešení projektu byl v roce 2017 dokončen vývoj a realizace stacionárního zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů (viz obr. 1). Vyvinuté zařízení je vhodné ke zkoušení krátkých oběžných lopatek parních turbín a po úpravě pracovního stolu i ke kontrole tyčí tažených lopatkových profilů s obvyklou délkou 4 metry. Pro kontrolu výrobků bezkontaktní kombinovanou magnetizací, s jejímž využitím lze v průběhu jednoho magnetizačního kroku detekovat výrobní trhliny bez ohledu na jejich orientaci.

Při zahájení vývoje zařízení byly definovány potřebné vstupní parametry, tj. velikost kontrolovaných lopatek, jejich konstrukční detaily atd. Byla stanovena podmínka, že navrhované zařízení musí být schopné kontrolovat lopatky vyráběné z tažených profilů a frézované lopatky (tzn. s úchytem lopatky do drážky disku nebo bubnu rotoru), a to i s integrovanou bandáží. Tvary těchto lopatek jsou geometricky složité a pro zajištění detekovatelnosti trhlín různé orientace je nutné vytvořit točivé magnetické pole dostatečné intenzity.

Zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů konstrukčně sestává z:

1. vlastního magnetizačního zdroje s příslušnou elektrovýstrojí,
2. kontrolního a regulačního systému,
3. dopravníku,
4. zařízení pro nanášení a zpětné jímání detekční kapaliny,
5. kontrolního pracoviště vybaveného zdrojem UV světla a příčnými etalony,
6. pomocných zařízení, která jsou nezbytná pro správné provedení kontroly.

Řešení pracoviště je provedeno tak, aby v závislosti na technických požadavcích a ekonomických možnostech provozovatele umožňovalo variabilitu svého uspořádání a aby jeho obsluhu byl schopen zajistit jeden člověk.

Na rychlost kontroly má vliv nejen uspořádání celého pracoviště, ale i použitý způsob magnetické kontroly. Z několika možností byla zvolena magnetická prášková polévací fluorescenční metoda. Tato metoda je považována za nejcitlivější a nejsnadněji aplikovatelnou metodu u stacionárních zařízení obdobné konstrukce.

Značná pozornost byla věnována výběru magnetizační jednotky. Pohyb dopravníku je nepřerušovaný (druhou možností byl pohyb přerušovaný). Demagnetizace lopatek je prováděna v demagnetizačním tunelu. Jako magnetizační zdroj bylo zvoleno zařízení firmy Tiede s dosažitelným proudem 1 000 A a napětím 42 V. Zdroj s těmito vlastnostmi zajišťuje intenzitu magnetického pole 25 A/cm, nezbytnou pro použití této kontrolní metody.





Obr. 1: Celkový pohled na zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů

### **Shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace**

V rámci řešení projektu bylo v roce 2017 provedeno hodnocení a vzájemné porovnání vlastností žárově stříkaných povlaků deponovaných pomocí technologie HP/HVOF. Materiály povlaků byly zvolené (na základě předchozích zkušeností) s ohledem na jejich potenciál odolávat mechanickému namáhání v prostředí vysoké teploty a v korozně agresivním prostředí.

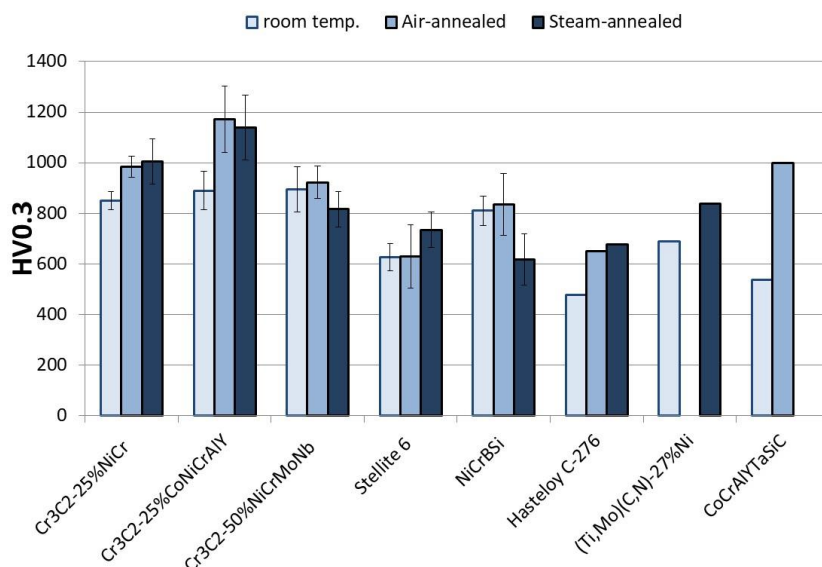
Porovnávací studie [4] obsahuje materiály povlaků na bázi karbidu chromu s různými typy matrice:  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -25%NiCr,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -25%CoNiCrAlY,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -50%NiCrMoNb, povlaky na bázi superslitin Co a Ni: Stellite 6, Hastelloy C-276, NiCrBSi, CoCrAlYTaCSi a experimentální materiál na bázi karbonitridu titanu:  $(\text{Ti},\text{Mo})(\text{C},\text{N})$ -27%Ni.

Nástřikové parametry pro jednotlivé materiály byly v předchozích etapách řešení projektu optimalizovány na základě hodnocení mikrostruktury, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Pro přípravu vzorků hodnocení mechanických vlastností a korozní odolnosti při pokojové teplotě a při teplotě odpovídající pracovním podmínkám (600 °C) byly použity parametry vedoucí k nástřiku s nejlepšími sledovanými vlastnostmi.

Porovnání odolnosti proti mechanickému zatěžování bylo provedeno na základě testů tvrdosti a mikrotvrdosti, odolnosti proti kluznému opotřebení dle ASTM G-99 (pin-on-disc test) při pokojové a při zvýšené (600 °C) teplotě, odolnosti proti cyklickému kluznému opotřebení dle ASTM G-133 (ball-on-flat test) při pokojové a při zvýšené (600 °C) teplotě, odolnosti proti abrazivnímu opotřebení dle ASTM G-65 (dry sand/rubber wheel test) při pokojové teplotě a odolnosti proti eroznímu opotřebení při pokojové teplotě. Odolnost proti oxidaci byla testována v prostředí horké tlakové páry (609 °C/24 MPa/132 h) ve spolupráci s Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze. Odolnost proti korozi byla testována v agresivním prostředí roztavených solí 40 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  60 %  $\text{V}_2\text{O}_5$  (750 °C/50 cyklů).

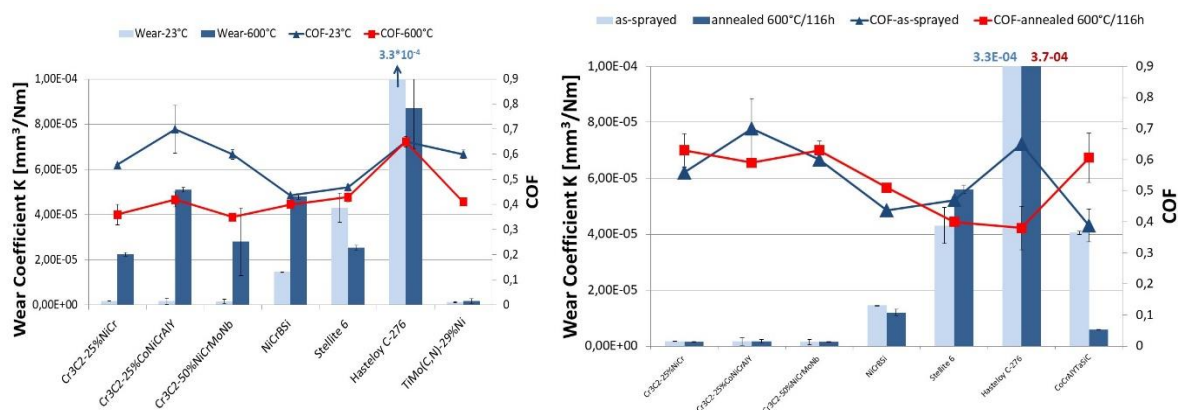
Hodnocení výsledků testů bylo doplněno analýzami mikrostruktury s využitím elektronového mikroskopu ve spolupráci s pracovišti Regionální technologický institut a Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni a XRD analýzami fázového složení ve spolupráci s Ústavem fyziky plazmatu Akademie věd České republiky.

Vybrané výsledky jsou uvedeny v grafech na obr. 2 až obr. 4.



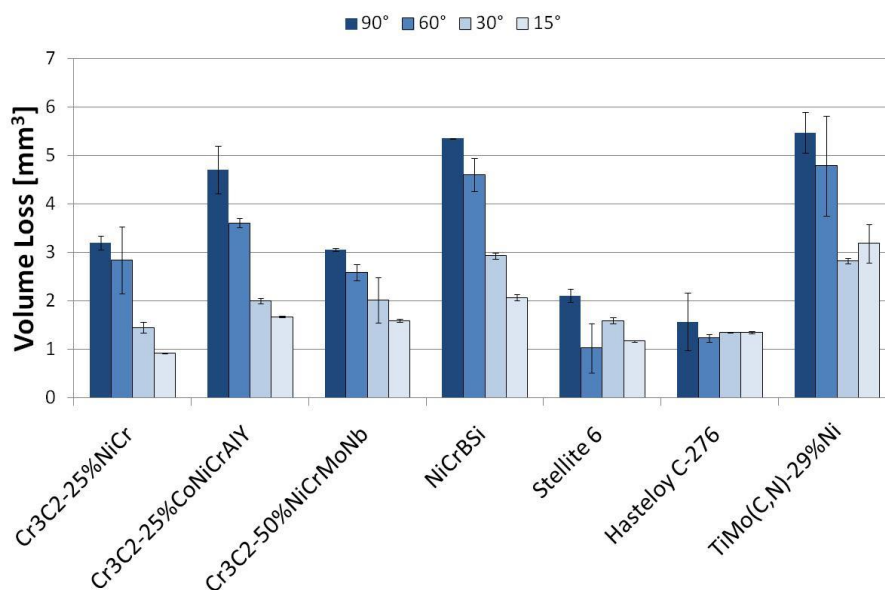
Obr. 2: Porovnání hodnot mikrotvrdosti HV0.3, měřené ve stavu po nástřiku (room temp.), po expozici 600 °C/116 h v horkém vzduchu (Air-annealed) a po expozici v prostředí horké tlakové páry 609 °C/24 MPa/132 h (Steam-annealed)

Mikrotvrdost povlaků na bázi karbidu chromu v kovové matici je dle očekávání vyšší než u povlaků na bázi slitin. Vliv tepelného ovlivnění na jednotlivé typy materiálů je různý, v závislosti na typu tepelně indukovaných změn mikrostruktury. Nárůst mikrotvrdosti u povlaku na bázi CrC souvisí s precipitací sekundárních karbidů z matrice. U slitinových povlaků se jedná o změnu stavu vnitřního pnutí a eventuální precipitaci tvrdých částic (karbidů nebo nitridů).



Obr. 3: Porovnání odolnosti proti kluznému opotřebení, hodnoceného pomocí ASTM G-133 za pokojové teploty ve stavu po nástřiku, při 600 °C a za pokojové teploty ve stavu po expozici 600 °C/116 h na horkém vzduchu

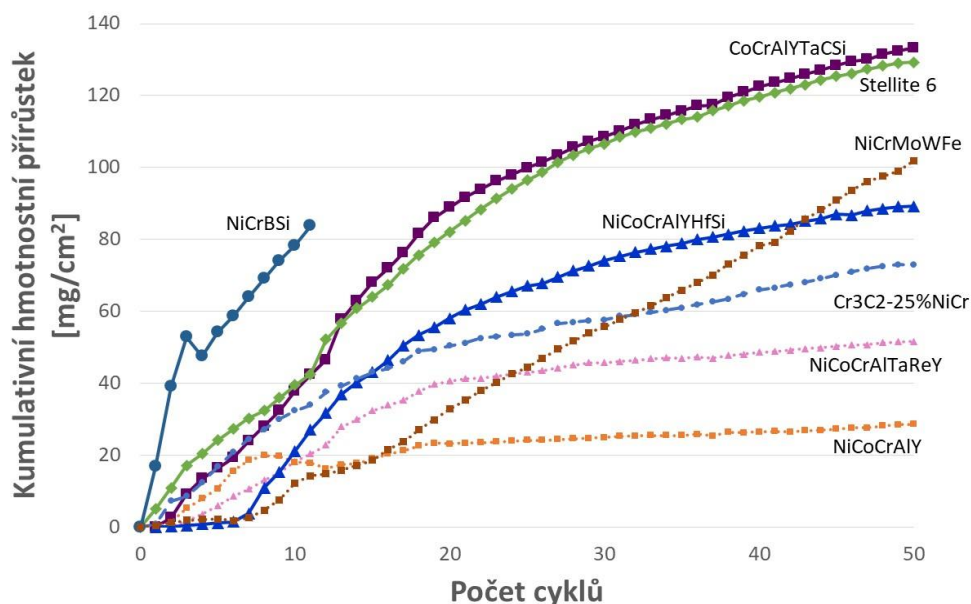
Při pokojové teplotě je, v souladu s očekáváním, odolnost povlaků na bázi karbidů výrazně nižší než u slitinových povlaků. Zatěžování při vysoké teplotě vede ke zvýšení opotřebení u všech hodnocených materiálů vlivem vyšší plastické schopnosti matrice či slitiny. Výjimkou je Stellite 6, u kterého mohla hrát roli zpevnění vlivem deformačně indukované transformace fcc mřížky Co na hcp strukturu s vyšší pevností a povlak Hasteloy C-276, u kterého je patrný pozitivní vliv oxidické vrstvy. Hodnoty opotřebení při vysoké teplotě, naměřené pro povlaky na bázi CrC a slitinové povlaky, jsou srovnatelné. Samotná tepelná expozice má nejednoznačný vliv na hodnocené povlaky, většinou však ne příliš výrazný. Výjimkou je povlak CoCrAlYTaSiC, u kterého tepelné zpracování vedlo k výrazně lepší odolnosti proti opotřebení.



Obr. 4: Porovnání erozní odolnosti povlaků při dopadu erodentu pod různými úhly

Na rozdíl od abrazivního a kluzného opotřebení, kde je výhodou vyšší tvrdost povlaků spojená především s povlaky na bázi cermetů, je v případě odolnosti proti eroznímu opotřebení rozhodující kohezni pevnost a houževnatost povlaků. To je patrné zejména v nízkém erozním úbytku materiálů Stellite 6 a Hasteloy C-276.

Odolnost proti korozi v korozně agresivním prostředí horkých roztavených solí [5] lze posoudit na základě grafu mapujícího přírůstek váhy korozních zplodin na obr. 5. Pro porovnání graf obsahuje i další slitinové povlaky, vhodné k aplikaci v tomto prostředí.



Obr. 5: Graf závislosti kumulovaných hmotnostních přírůstků na čísle cyklu testovaných povlaků během expozice v korozním prostředí 40 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 60 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Z grafu na obr. 5 je patrné, že nejméně odolným se ukázal povlak NiCrBSi. Naopak, ostatní typy slitin na bázi Ni prokázaly vysokou odolnost v daném korozním prostředí, a to včetně povlaku Hasteloy C-276 (NiCrMoWFe). Matrice NiCr poskytuje odolnost i cermetovému povlaku na bázi karbidu chromu. Obě kobaltové slitiny (Stellite 6 a CoCrAlTaSiC) mají téměř totožnou odolnost v daném prostředí.

V prostředí horké tlakové páry se jako nejvíce odolný ukázal slitinový povlak Hasteloy C-276 a Stellite 6, naopak, jako nevhodný povlak  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$  a  $\text{NiCrBSi}$ .

Na základě provedených experimentů lze zobecnit následující doporučení:

1. Pro aplikace vyžadující vysokou odolnost proti opotřebení za současného působení vysoké teploty je nejvhodnější aplikovat povlak  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-50\%NiCrMoNb}$ . Kromě vysoké odolnosti proti oxidaci nabízí srovnatelnou odolnost proti opotřebení a zároveň má vyšší depoziční účinnost.
2. Pro aplikace vyžadující zejména odolnost proti korozi a oxidaci lze doporučit povlak Hastelloy C-276. Jeho další výhodou je vysoká odolnost proti erozi. Při vysokých teplotách jsou jeho vlastnosti, vlivem vzniku oxidické vrstvy, lepší než při pokojové teplotě. Nicméně, je nutné počítat s možným zhoršením houževnatosti vlivem precipitace karbidu.
3. Pro aplikace vyžadující zejména odolnost proti korozi a oxidaci a zároveň i odolnost proti kluznému opotřebení je vhodné aplikovat povlak na bázi Co: Stellite 6 nebo  $\text{CoCrAlYTaNi}$ . Oba povlaky navíc poskytují možnost deformačního zpevnění při zatěžování. Tento efekt je na základě provedených experimentů zřejmý, avšak nebyl zatím detailně zmapován. Roli zde hraje nejen stav povlaku, tedy poměr fcc a hcp uspořádání, ale i míra plastické deformace.
4. Pro aplikace vyžadující dobré kluzné vlastnosti při mírně zvýšených teplotách lze doporučit experimentální povlak  $(\text{Ti},\text{Mo})(\text{C},\text{N})\text{-Ni}$ .
5. Pro agresivní prostředí horké páry není vhodný povlak  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%CoNiCrAlY}$  (od daného výrobce) a povlak  $\text{NiCrBSi}$ , u kterých se projeví výrazná oxidace.

#### 4. Závěr

V příspěvku je uveden výčet výsledků řešení projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci byl vytvořen i tento příspěvek) dosažených v roce 2017 a dva jsou stručně představeny (vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace).

Na rok 2018 je plánováno dosažení 11 odborných výsledků řešení projektu.

#### Literatura

- [1] Polach, P. (2012): *Energetické centrum kompetence, sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] Polach, P. (2016): *Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu, sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] Polach, P., Černý, V., Václavík, J. (2017): *Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu, sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] Houdková, Š., Česánek, Z. (2017): *Tepelně-mechanické vlastnosti vybraných žárově stříkaných povlaků, výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/042*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [5] Česánek, Z., Kopelentová, K., Houdková, Š. (2017): *Vysokoteplotní koroze žárově stříkaných povlaků aplikovaných technologií HP/HVOF v korozním prostředí  $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 60\%\text{V}_2\text{O}_5$ , výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/058*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

# PŘÍKLAD NÍZKÉ VYPOVÍDACÍ SCHOPNOSTI PROJEKTOVÝCH PARAMETRŮ VT PAROVODŮ PRO PLÁNOVÁNÍ PRODLUŽOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI JEJICH KOMPONENT

## EXAMPLE OF LOW INFORMATION CAPABILITY OF PROJECTED PARAMETERS FOR LIFETIME EXTENSION OF HIGH PRESSURE VESSELS

Ladislav Horváth<sup>a)</sup>, Jakub Horváth<sup>a,c)</sup>, Martin Smejkal<sup>b)</sup> a Marie Rohlová<sup>c)</sup>

a) UJP PRAHA a.s.

b) VAMET, s.r.o.

c) Ústav materiálového inženýrství FS ČVUT v Praze

### Abstrakt

Zobecnění informací, získaných na jednom kotli pro kotle dalších bloků elektráren, postavených ve stejné době a zhruba i stejně provozovaných je obecně používaný postup. Uvedený příspěvek ukazuje, že ne vždy je možné tento postup použít.

### Abstract

Generalized procedure for boilers and high pressure vessel lifetime assessment is usage of creep data and roughly the same operation time between boilers. This paper present results that this procedure is not always possible to use.

### Aplikace výsledků creepových zkoušek dané oceli i obdobných zařízení

Výstavbu tepelných energetických bloků v naší republice je možné zhruba rozdělit do dvou etap. První etapu představuje výstavba 100 (110) MW bloků, která začala prototypem 100 MW na elektrárně Tisová v roce 1960 a skončila v roce 1971 dokončením čtyř bloků 110 MW elektrárny Mělník II. Druhou etapu byla výstavba 200MW bloků, která začala výstavbou prototypu na elektrárně Ledvice v roce 1967 a skončila v roce 1978 dostavbou elektrárny Chvaletice. U většiny těchto celků je možné hovořit o širokém nasazení oceli 15128 na bázi 0,5 Cr – 0,5 Mo – 0,25 V, která po zvládnutí technologie svařování a tepelného zpracování nahradila ocel 15 313. Je třeba zdůraznit, že ocel 15 128 představuje nejlépe prozkoušenou Čs. ocel z pohledu žárupevnosti, u které byly creepové zkoušky prováděny až za hranici 2 10<sup>5</sup> hodin. Z pohledu výpočtového posuzování by díky plně ověřeným hodnotám dlouhodobé pevnosti při tečení neměl být žádný problém.

Nutnost opravy tvrdonávaru těsnicí plochy šoupátka DN 250, PN160 si vynutila vyříznutí kovaného tělesa z VT parovodu parního uzlu elektrárenského bloku. Šoupátko bylo provozováno cca. 8 10<sup>4</sup> hodin při projektových parametrech – teplota přehřáté páry 535 °C, přetlak páry 9,6 MPa. Ocel tělesa je 15 128. Přístupnost tělesa z jeho průtočné části umožnila získat podklady pro předpokládané rozhodnutí o prodloužení životnosti nad hodnotu 10<sup>5</sup> provozních hodin garantovaných výrobcem šoupátka a zobecnit toto rozhodnutí i na zbylé tři bloky. Výsledky provedeného výpočtu creepové a únavové životnosti pro projektové parametry se však neshodují se skutečným stavem materiálu tělesa, zjištěným NDT metodami. Příspěvek ukazuje, jak se vysvětlení této skutečnosti promítne do plánování prodlužování životnosti komponent VT parovodu.

### Výpočtové hodnocení

Pomocí programového souboru PMD [1] na komplexním modelu tečení [2] byly zavedeny okrajové podmínky od tlaku 9,6 MPa a teploty 535 °C. Na obr. 1 jsou vyznačeny oblasti odběru replik. V těchto místech dosahuje napjatost hodnoty okolo 25 MPa (obr. 2), což dá pro teplotu 535 °C hodnotu bezpečnosti k limitu časové pevnosti 100 tis. hodin větší než 2,5. Z hlediska

degradačního mechanismu, s uvážením nominálních dat teploty a tlaku, nedochází k relevantnímu creepovému poškození ani deformaci. Také výpočet únavového poškození s použitím [3] skončil závěrem, že provoz za nominálních podmínek se z hlediska únavy pohybuje v trvalé životnosti.

Provedené výpočtové hodnocení je v plném souladu s našimi zkušenostmi z měření na obdobných kotlích pracujících při srovnatelných teplotách a tlacích přehřáté páry. Stejně výsledky dá i použití Monkman-Grantova vztahu, do kterého se dosadí rychlost creepu určená z její závislosti na napětí publikovaná v pracích Vítkovice – Výzkum a vývoj s.r.o., resp. MMV s.r.o. [4, 5, 6].

### **Výsledky vyhodnocení sejmutých strukturních replik doplněné o měření tvrdosti**

Provedené replikové zkoušky ukázaly, že struktura v místě odběru replik, zejména na vnitřním povrchu výstupu páry ze šoupátka je silně degradovaná. Ve struktuře jsou také patrné ojedinelé kavity bez převažující orientace. Podle klasifikace zavedené v [7] je creepové poškození v oblasti 2a až 2b (obr. 3). Protože překročení teploty a tlaku není z důvodu ochrany na turbíně pravděpodobné, muselo být těleso šoupátka vystaveno přídavnému namáhání.

### **Interpretace**

Na pravděpodobnou příčinu rozporu ve výsledcích ukázaly výsledky měření tvrdosti po délce průtočné části šoupátka, které vyšly přímo úměrně tuhosti tělesa v jednotlivých částech a tomu odpovídajícímu rozložení velikosti redukovaného napětí při změně okrajových podmínek tak, že byl omezen axiální posuv v přilehlém uložení parovodu. Z toho bylo vyvozeno, že kluzná uložení parního uzlu obr. 4 nepracují podle projektových předpokladů, což vede ke zvýšení sil a momentů působících na těleso a následné akceleraci creepového poškození.

### **Závěr**

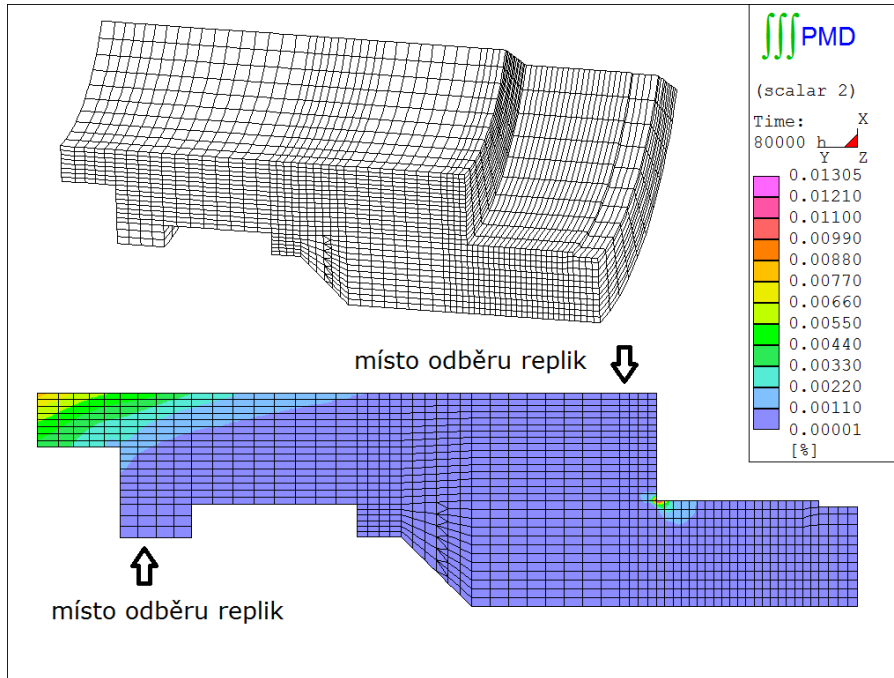
Provedené práce doložily, že strukturní stav tělesa šoupátka zřejmě neumožní prodloužení jeho životnosti nad 105 hodin. Získané výsledky jsou ovlivněny vlivy, které mohou být pro parní uzly ostatních bloků výrazně odlišné a nelze proto závěr o stavu tělesa zobecnit na další bloky. Vzhledem ke zdokumentovanému stavu tělesa šoupátka je nutné očekávat i creepové poškození ostatních komponent parního uzlu (kolen, T kusů). Tomu bude nutno přizpůsobit plán kontrol.

### **Literatura**

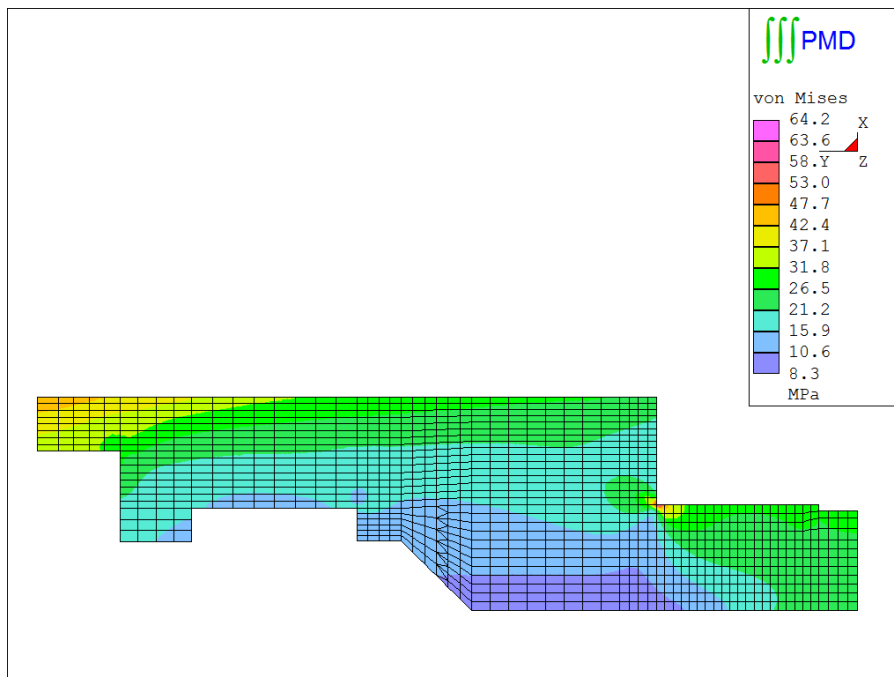
- [1] (2015): *Soubor programů PMD/PMD-GFEM* byl stanoviskem Komise č.5 „Pevnostní výpočty komponent a potrubních systémů“ ze dne 24.11.2015 doporučen pro vytváření podkladů pro bezpečnostní dokumentaci jaderných elektráren typu VVER. (před tímto datem byl soubor PMD atestován Státním úřadem pro jadernou bezpečnost pod registračním číslem 531)
- [2] Bína a kol. (1999): *Komplexní model tečení. Evaluation of Long Term Creep Data and Application of Results in Lifetime Assessment in East Europe*, VDEh.
- [3] Kneifl, M. a kol. (1988): *Vlastnosti ocele 15128 namáhané únavou a tečením*. Zpráva SVÚM Z-88-5822.
- [4] Stejskalová, Š. (2007): *Závěrečná zpráva úkolu „Hodnocení zbytkové životnosti parovodů kotle K3 v Elektrárně Chvaletice“, II. etapa – Hodnocení creepových vlastností a zbytkové životnosti ohybu a svarového spoje*. Zpráva Vítkovice – Výzkum a vývoj s.r.o., č. zprávy: Z-11/2007.
- [5] Kuboň, Z. (2016): *Materiálové zkoušky trubek kotlů K3 a K4 Elektrárny Chvaletice (Sev. en EC) po dlouhodobém provozu (závěrečná zpráva)*. Technická zpráva T-46/2016, MMV.s.r.o.



- [6] Kuboň, Z., Jedličková, M. (1988): *Využití rovnic Monkman-Granta a Dobeše-Miličky pro predikci žárupevnosti nízkolegovaných CrMoV ocelí*. Interní zpráva VÍTKOVICE, Železářny a strojířny K. Gottwalda, Výzkumný ústav strojířenský a metalurgický, Ostrava.
- [7] (2005): *Richtreihen zur Bewertung der Gefügeausbildung und Zeitstandschähle für Hochdruckrohrleitungen und Kesselbauteile VGB-TW 507, 2. Ausgabe 2005*. VGB-Power Tech Service GmbH.

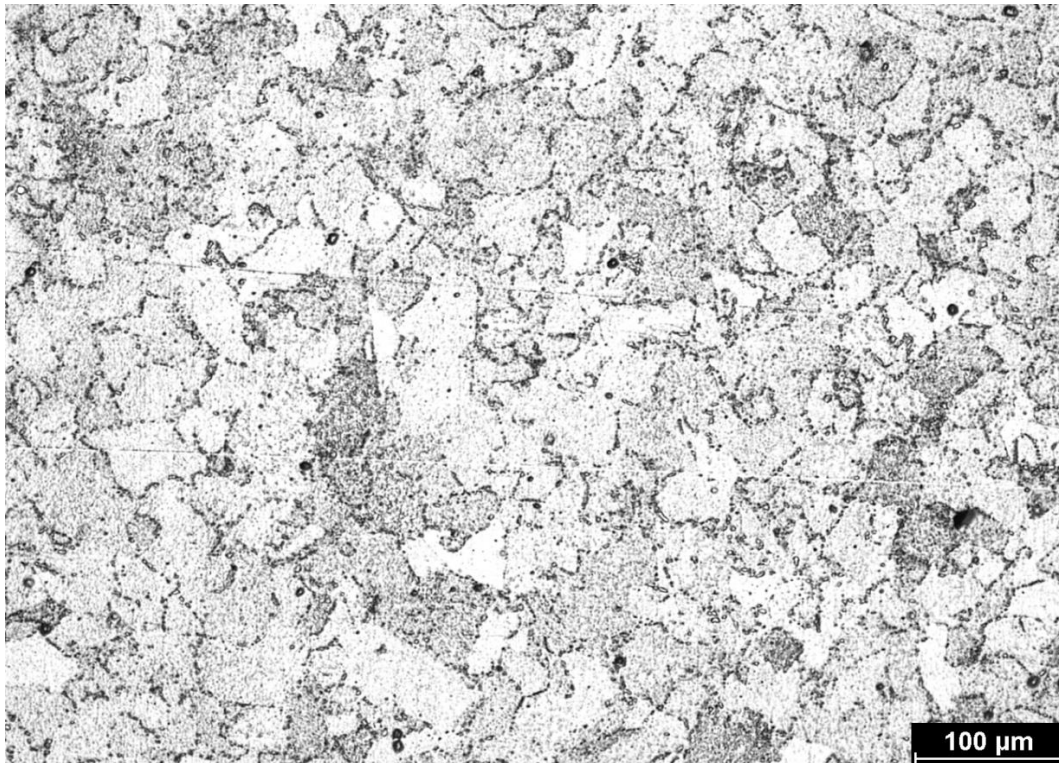


Obr. 1: Výpočtové creepové poškození po 80 tisícichozních hodinách



Obr. 2: Elastická napjatost v čase 0 hodin





Obr. 3: Strukturální stav vnitřního povrchu průtočné části



Obr. 4: Parní uzel se šoupátkem a pohled na uložení

# VLIV KRÁTKODOBÉHO DEGRADAČNÍHO ŽÍHÁNÍ OCELI P92 NA ZMĚNU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ Z HLEDISKA PRECIPITACE LAVESOVY FÁZE

## INFLUENCE OF SHORT-TERM AGEING AND PRECIPITATION OF LAVES PHASE ON MECHANICAL PROPERTIES OF P92 STEEL

Michal Junek<sup>a),b)</sup>, Marie Svobodová<sup>a)</sup> a Jiří Janovec<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha-Zbraslav

<sup>b)</sup> Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Karlovo nám. 13, Praha 2

### Abstrakt

Príspevek se zabývá hodnocením vlivu krátkodobého laboratorního žihání (650 °C, 100 až 20 000 hodin) martenzitické oceli P92 z hlediska probíhajících mikrostrukturních změn. V průběhu teplotní expozice dochází k postupnému procesu hrubnutí karbidických částic a precipitaci Lavesovy fáze, což má zásadní vliv na změnu mechanických vlastností dané oceli. Sledováním těchto změn probíhajících v mikrostruktuře oceli byly vytvořeny stereologické závislosti precipitujících částic, které lze korelovat s výslednými mechanickými vlastnostmi. V závěru je diskutována aplikovatelnost těchto korelací na usuzování stavu provozovaných komponent na blocích elektráren.

### Abstract

The paper deals with the evaluation of the influence of short-term laboratory ageing (650 °C, 100 to 20 000 hours) of martensitic steel P92 in view of ongoing microstructural changes. During thermal exposure process, a coarsening of the carbide particles and precipitation of Laves phase has a significant effect on mechanical properties of the P92 steel. Based on these microstructural changes, stereological dependencies of Laves phase were created. These results are compared with the mechanical and creep properties.

### Úvod

Klíčovým materiálem pro provoz nadkritických bloků elektráren pracujících při teplotách páry okolo 600 °C a tlacích okolo 20 MPa je 9% Cr žárovevná martenzitická ocel P92, jejíž zvýšené žárovevnosti je dosaženo precipitačním a substitučním zpevněním tuhého roztoku především zvýšeným obsahem Cr, Mo, V, Nb a W. Během provozní expozice dochází k mikrostrukturním změnám, které jsou mimo jiné doprovázeny precipitací křehké intermetalické Lavesovy fáze. Tato fáze hraje výraznou roli v průběhu provozní expozice, jelikož nepříznivě ovlivňuje mechanické a creepové vlastnosti. V první fázi vede precipitace Lavesovy fáze k ochuzení tuhého roztoku o substituční prvky jako je Mo a W, čímž je sníženo substituční zpevnění tuhého roztoku oceli. Následná precipitace a hrubnutí Lavesovy fáze na hranicích martenzitických latěk a na hranicích primárních austenitických zrn negativně ovlivňuje mechanické a creepové vlastnosti, především vrubovou houževnatost. Hrubé částice Lavesovy fáze na hranicích zrn mohou iniciovat vznik a následný rozvoj creepového kavitačního poškození.

### Experimentální materiál

Experimentální práce byly provedeny na výřezech z rovné části ohybu parovodní trubky z oceli P92 o rozměrech OD 350 x 39 mm, chemické složení a výchozí mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1. První výřez označený jako výchozí stav ARI byl podroben výchozímu tepelnému zpracování (TZ) u španělského výrobce trubky (Productos Tubulares): 1050 °C/60 min + 780 °C/140 min. Druhý výřez označený jako výchozí stav ARII byl ještě dodatečně tepelně zpracován po ohnutí trubky u výrobce ohybu (MODŘANY Power, a.s.): 1050 °C/ 60 min + 775 °C/140 min. Výchozí stav ARI byl rozřezán na 5 kusů, z nichž 4 byly podrobeny degradačnímu isothermickému žihání při teplotě 650 °C po dobu 1 000 h, 5 000 h,

10 000 h a 20 000 h. Výchozí stav ARII byl rozřezán na 9 kusů, z nichž 8 bylo podrobeno stejnému degradačnímu žíhání při teplotě 650 °C po dobu 100 h, 200 h, 500 h, 1 000 h, 2 000 h, 5 000 h, 10 000 h a 20 000 h. Po laboratorních expozicích byly ze všech stavů vyrobeny vzorky pro kontrolu mikrostruktury, měření tvrdosti, zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu a creepové zkoušky. Výroba creepových vzorků a creepové zkoušky s následným vyhodnocením probíhala v kooperaci s Ústavem fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

## Rozbor mikrostruktury

Mikrostruktura výchozích stavů ARI a ARII je srovnatelná, v obou případech je tvořena popuštěným martenzitem s jemnými karbidy  $M_{23}C_6$  na hranicích primárního austenitického zrna, martenzitických latěk a uvnitř sub zrn (MX částice), viz ukázka na obr. 1a, b. V průběhu teplotních expozic dochází k dalšímu popuštění martenzitické matrice, hrubnutí karbidických částic  $M_{23}C_6$  a k precipitaci a následnému růstu Lavesovy fáze  $(Fe,Cr)_2(Mo,W)$ .

V případě výchozího stavu ARII (dvojí TZ) dochází již po 100 h teplotní expozice při 650 °C k precipitaci Lavesovy fáze o velikosti ~350 nm s objemovým podílem ~0,04 %. V průběhu prvních 2 000 h expozice dochází k výraznému hrubnutí této fáze (~610 nm), zvýšení objemového podílu (~1,55 %), zvýšení počtu částic a snížení volné mezičásticové vzdálenosti. Při delších expozičních dobách (až 20 000 h) je objemový podíl Lavesovy fáze téměř konstantní, vlivem koagulace dochází k mírnému hrubnutí (~880 nm) a s tím spojenému snižování počtu částic, viz závislosti na obr. 2. Výchozí stav ARI (primární TZ) má z hlediska precipitace a následného růstu Lavesovy fáze obdobný charakter jako v případě výchozího stavu ARII. Ale s tím rozdílem, že objemový podíl Lavesovy fáze se po cca 2 000 h ustálí na cca poloviční hodnotě (~0,67 %) s cca třetinovou velikostí částic (~440 nm), viz grafické závislosti na obr. 2. obr. 1c, d porovnáva snímky Lavesovy fáze po 20 000 h expozice, na kterých je patrný rozdíl velikosti Lavesovy fáze stavu ARI a ARII. Snímky byly pořízeny elektronovým mikroskopem v režimu zpětně odražených elektronů.

## Mechanické vlastnosti

Výchozí mechanické vlastnosti stavů ARI a ARII jsou téměř totožné, viz tabulka 1. Následné teplotní expozice těchto stavů, které prokázaly rozdílné chování z hlediska precipitace Lavesovy fáze, neměly výrazný vliv na hodnoty tvrdostí a pevností exponovaných vzorků, viz tabulka 2. Naopak tomu bylo v případě zkoušek rázem v ohybu, kdy u stavu ARII (hrubší Lavesova fáze) došlo s rostoucí dobou teplotní expozice k postupnému posunu přechodové teploty z výchozích -21 °C k +97 °C. U výchozího stavu ARI takovýto plynulý posun přechodové teploty s rostoucím časem teplotní expozice pozorován nebyl, přechodová teplota se již po 5 000 h expozice posunula z výchozích -43 °C k +74 °C, kde zůstává konstantní i při delších expozičních časech, viz obr. 3. Creepové zkoušky při 600 °C a 650 °C prokázaly, že i velmi krátké teplotní expozice výchozích stavů vedou ke snížení creepové životnosti [1]. Roli hraje i výše aplikovaného tahového napětí, čím vyšší je napětí, tím menší je pokles creepové životnosti exponovaných vzorků. Dále lze přijmout stanovisko, že výchozí stav ARII vykazuje nižší creepovou odolnost než stav ARI, viz obr. 4.

## Závěr

Z rozdílného chování výchozích stavů ARI a ARII z hlediska precipitace Lavesovy fáze lze usuzovat, že dvojí teplené zpracování vede ke zhoršení strukturní stability oceli P92. Tomu odpovídají i nalezená data v literatuře [2], kde velikost Lavesovy fáze odpovídá námi změřeným velikostem u stavu ARI, viz obr. 1a. Podíl a velikost fáze nemá výrazný vliv na tvrdost a pevnost oceli, ale výrazněji se projevuje v případě creepové životnosti a posunu přechodové teploty. Krátkodobé laboratorní žíhání vzorků vede k významnému snížení creepové životnosti oceli P92 ve srovnání s úrovní creepové životnosti výchozích stavů, s tím že nejmarkantnější pokles je pozorován při zkušební teplotě 600 °C již po 500 h expozice.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektů 2A-1TP1/057, TA02010260, TH020200295 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/215/OHK2/3T/12.

## Literatura

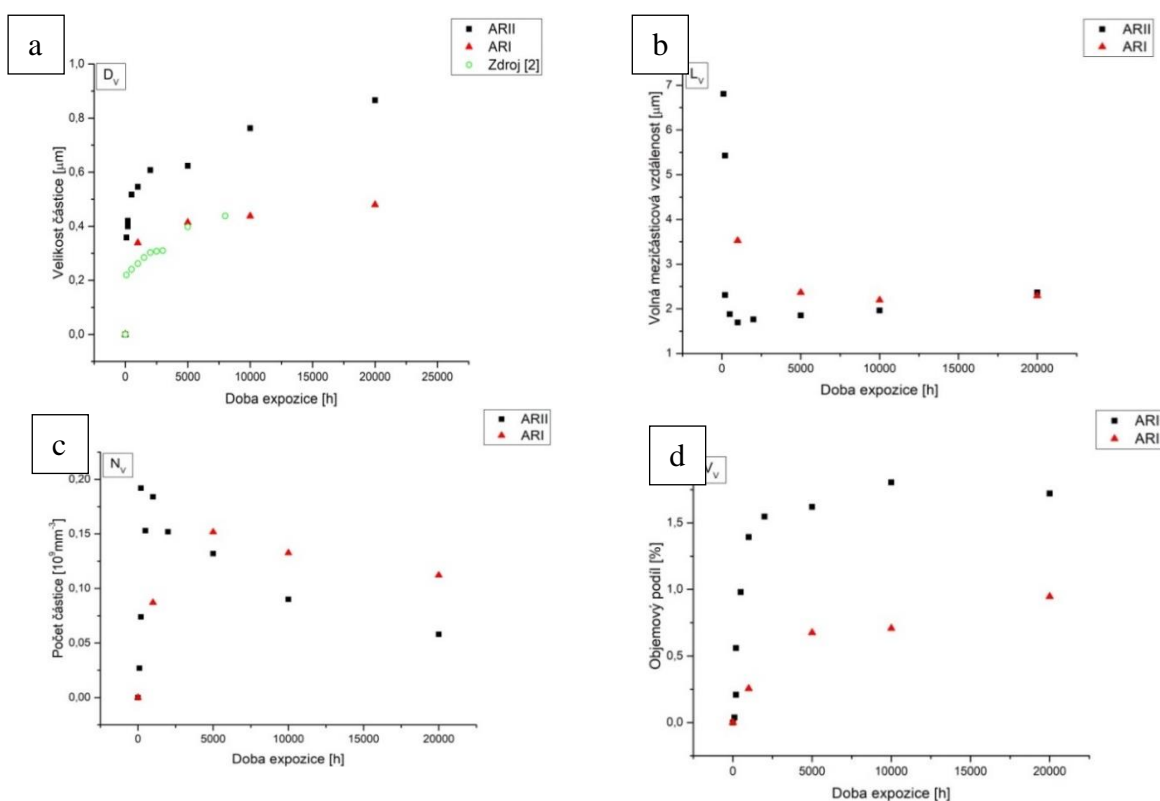
- [1] Sklenicka, V., Kucharova, K., Svobodova, M., Kral, P., Kvapilova, M., Dvorak, J. (2018): *The effect of a prior short-term ageing on mechanical and creep properties of P92 steel.* Materials Characterization, Vol. 136, pp. 388-397. ISSN 1044-5803
- [2] Wang, Xue; Xu, Qiang; Yu, Shu-min; Hu, Lei; Liu, Hong; Ren, Yao-yao (2015): *Laves-phase evolution during aging in 9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb steel for USC power plants.* Materials Chemistry and Physics, Vol. 163, pp. 219-228. ISSN 0254-0584

Tabulka 1: Chemické složení v hmotnostní % a výchozí mechanické vlastnosti oceli P92

Mat.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N	W	Ostatní
60074	0,11	0,37	0,48	0,013	0,005	8,58	0,33	0,23	0,06	0,037	1,62	B0,002;Al0,02
Mat.	Mez kluzu $R_{p0,2}$			Mez pevnosti $R_m$			Tažnost A		Tvrdost			
60074	555 MPa			737 MPa			23,7 %		218 HB (233 HV)			
ARI	557 MPa			718 MPa			22,4 %		223 HV10			
ARII	558 MPa			724 MPa			23,0 %		229 HV10			

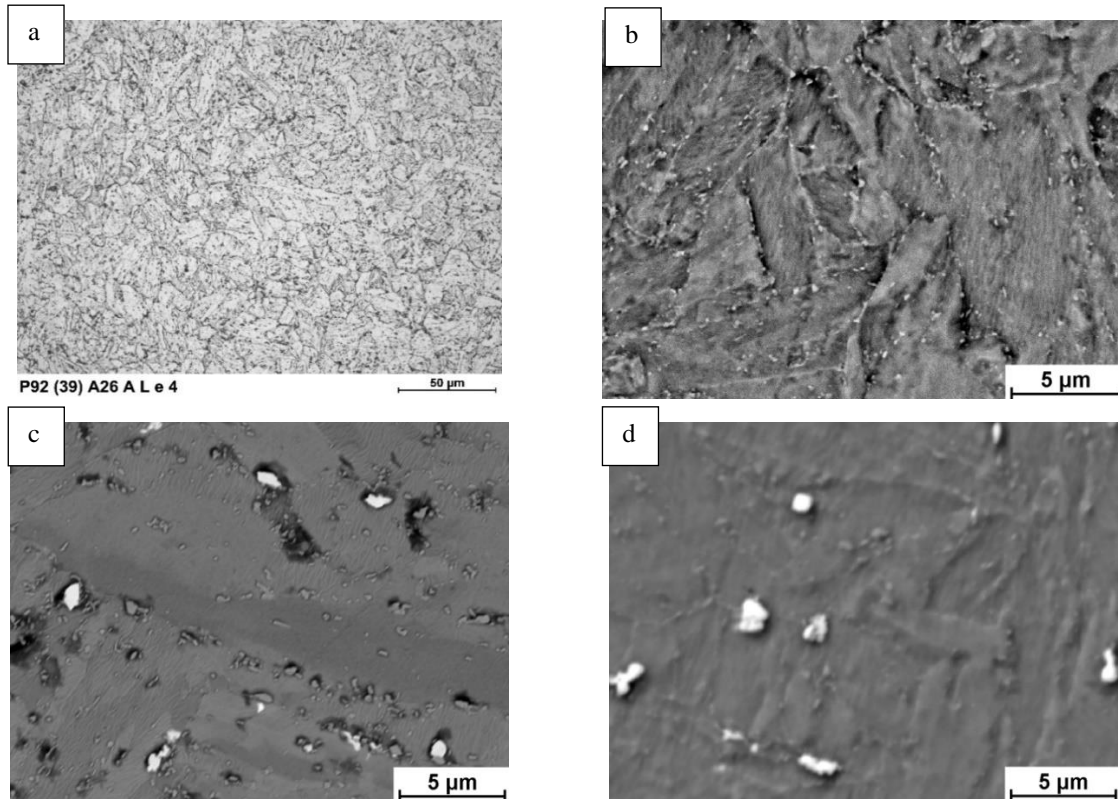
Tabulka 2: Mech. vl. stavu ARI a ARII v průběhu teplotní expozice ( $R_{p0,2}$ ;  $R_m$  - MPa;  $T_p$  - °C)

Stav	0 h				5 000 h				10 000 h				20 000 h			
	HV	$R_{p0,2}$	$R_m$	$T_p$	HV	$R_{p0,2}$	$R_m$	$T_p$	HV	$R_{p0,2}$	$R_m$	$T_p$	HV	$R_{p0,2}$	$R_m$	$T_p$
ARI	223	557	718	-43	215	515	685	+74	212	520	695	+74	213	518	669	+74
ARII	229	558	724	-21	223	533	695	+30	223	524	682	+41	210	487	682	+97

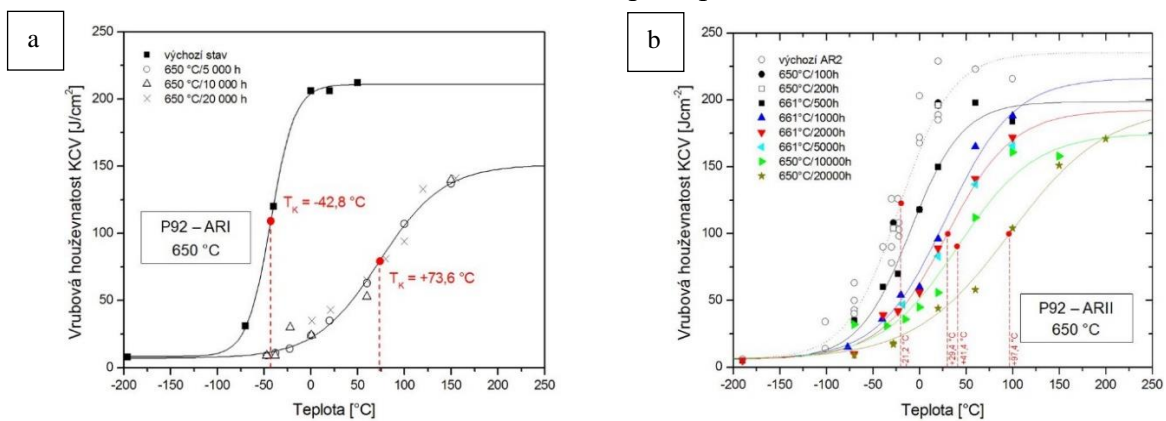


Obr. 1: Závislosti růstu Lavesovy fáze v průběhu expozice při 650 °C: a) velikosti částic, b) volné mezičásticové vzdálenosti, c) počtu částic, d) objemového podílu částic

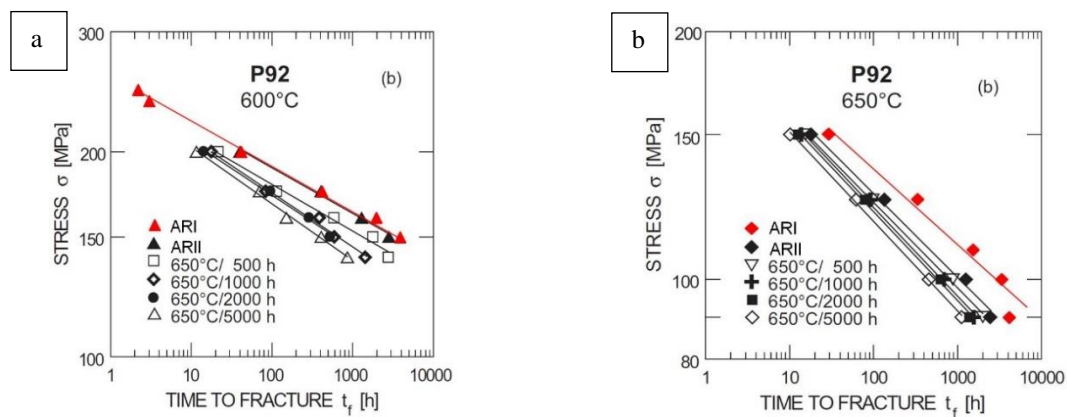




Obr. 2: Porovnání mikrostruktury oceli P92: a, b) výchozí stav ARII; c) stav ARI po expozici 650 °C/20 000 h; d) stav ARII po expozici 650 °C/20 000 h



Obr. 3: Změny KCV v závislosti na teplotě: a) výchozí stav ARI, b) výchozí stav ARII



Obr. 4: Závislost napětí na době do lomu: a) pro 600 °C, b) pro 650 °C [1]

# ŽÁRUPEVNÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÉ OCELE CB2 V ZÁKLADNÍM STAVU A PO SVAŘENÍ

## HIGH TEMPERATURE PROPERTIES OF STEEL CB2 IN BASIC CONDITION AND AFTER WELDING

Šárka Neumannová<sup>a)</sup>, Tomáš Vlasák<sup>a)</sup>, Jan Hakl<sup>a)</sup>, Jan Čech<sup>b)</sup> a Libuše Havelková<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> SVÚM a.s., Tovární 2053, 250 88 Čelákovice

<sup>b)</sup> ŽĐAS a.s., Strojírenská 6, 591 71 Žďár nad Sázavou

### Abstrakt

Príspevek popisuje creepové vlastnosti ocele CB2. Tyto vlastnosti se v dostupné literatuře téměř nevyskytují. Ve SVÚM, a.s. byl testován materiál vyrobený firmou ŽĐAS, a.s. V rámci spolupráce byly zkušeny krátkodobé mechanické vlastnosti a dlouhodobé creepové vlastnosti základního materiálu. Článek se zaměřuje především na žárupevné vlastnosti ocele CB2 a na jejich ovlivnění homogenním svarovým spojem.

### Abstract

This paper describes creep properties of CB2 steel. These properties are almost absent in the available literature. In SVUM, a.s. was tested the material produced by ŽĐAS, a.s. Short-term mechanical properties and long-term creep properties of the base material were tested during the cooperation. The paper focuses mainly on the creep properties of CB2 steel and on their influence on the homogeneous weld.

### Úvod

Růst účinnosti uhelných elektráren je hnací silou vývoje nových žárupevných materiálů. Martenzitické ocele oproti nízkolegovaným žárupevným materiálům umožňují zvýšit teplotu páry o zhruba 50 °C. Kromě zvýšené žárupevnosti mají tyto materiály také vyšší korozivzdornost. Jsou používány pro odlévání vík ventilů, ucpávkových těles, komor a skříní parních turbin. Jsou používány i pro výrobu dalších dílů v chemickém průmyslu. Výroba částí z martenzitických ocelí, zejména z americké P91, japonské P92 a evropské CB2, byla plně zvládnuta v a.s. ŽĐAS. Ukázka odlitku z martenzitické ocele je na obr. 1.

Martenzitická ocel CB2 byla vyvinuta v rámci evropského programu COST 536 [1]. Je určena především pro výrobu dílů, které jsou dlouhodobě vystaveny teplotám do 620 °C. Předmětem našeho zkoušení byla litá verze tohoto materiálu (označovaná znakem GX13CrMoCoVNbBN1011). Na základě creepových zkoušek základního materiálu a svarového spoje byla stanovena míra snížení žárupevných vlastností po svaření materiálu.

### Materiál použitý ke studiu

Ve ŽĐAS a.s. bylo odlito několik taveb, jejichž chemické složení bylo v souladu s údaji, které jsou vedeny v tabulce 1. Materiál těchto taveb byl použit po tepelném zpracování (tabulka 2) jak pro zkoušky žárupevnosti, tak i pro studium krátkodobých vlastností. Ty jsou vedle chemického složení předmětem atestu a byly uveřejněny během minulé konference [2].

Pro porovnání žárupevnosti základního materiálu a materiálu po svařování byla odlita tavba 471988 (viz tabulka 1). Pro materiál se svarovým spojem byl přidán jeden stupeň tepelného zpracování (tabulka 2). Kromě výsledků creepových zkoušek, které probíhaly v SVÚM, byly do hodnoceného souboru zařazeny i výsledky zkoušek žárupevnosti ocele CB2 nalezené v literatuře [3].

Pro zkoušení materiálu se svarovým spojem byly vyrobeny vzorky tak, aby tepelně ovlivněná zóna byla v polovině měrné délky vzorku (viz obr. 2).

## Creepová životnost základního materiálu

Výsledky zkoušek základního materiálu byly zpracovány pomocí Larson – Millerova parametru  $P_{LM}$  podle regresního modelu

$$\log \sigma = A_1 + A_2 P_{LM} + A_3 P_{LM}^2, \quad (1)$$

kde  $P_{LM} = T(\log t_r + A_4)$ ,  $\sigma$  je napětí [MPa],  $T$  je teplota [K],  $t_r$  je doba do lomu [h], a  $A_1 - A_4$  jsou materiálové konstanty, uvedené v tabulce 3. Hodnota konstanty  $A_4$  byly zvolena 35.

Závislost napětí na Larson – Millerově parametru pro základní materiál je zobrazena na obr. 3.

Jiné zobrazení podává obr. 4, kde je vynesena závislost napětí na době do lomu pro teploty 600 až 650 °C. Odtud je zřejmé, z jak dlouhých zkoušek jsou zpracovány žárupevné vlastnosti základního materiálu ocele CB2.

## Vliv svařování na žárupevnost ocele CB2

Závislost napětí na Larson – Millerově parametru je zachycena na obr. 5 (základní materiál) a na obr. 6 (svarové spoje). Je zřejmé, že jednotlivé životnosti jsou v těsné blízkosti s čarou středních hodnot. Nejdelší zkouška v základním stavu dosáhla 20 722 hodin. Nejdelší zkouška svařovaného souboru dosáhla 16 176 hodin. Tyto výsledky byly vyhodnoceny obdobným způsobem jako základní stav materiálu CB2. Na obr. 7 je zachycen pokles životnosti vlivem svařování. Je zřejmé, že při nižších teplotách a kratších dobách do lomu obě křivky splývají. To znamená, že vliv svařování se neprojevuje. Až při vyšších parametrech, které nastávají zhruba od hodnoty  $LMP = 34\,500$ , dochází k poklesu životnosti svařovaných spojů. Odhad poklesu tohoto parametru je možno znázornit, jak je zřejmé z obr. 8.

## Diskuse

Porovnáním našich výsledků, s výsledky dosaženými u jiných martenzitických ocelí [4], dojdeme k závěru, že v případě ocele CB2 je pokles žárupevnosti vlivem svařování mírnější. Je ovšem třeba vzít v úvahu, že v práci [4] jsou uvedeny výsledky více taveb ocelí pro doby do lomu téměř řádu 105 hodin. Naše se opírají o zkoušky jedné tavy, kde doby do lomu byly řádově v 104 hodinách. Je tedy pravděpodobné, že při delších zkouškách by pokles žárupevných vlastností byl výraznější.

## Závěr

V příspěvku jsou uvedeny výsledky zkoušek žárupevnosti základního materiálu ocele CB2, která byla vyrobena v ŽĎAS, a.s., a které byly doplněny o výsledky zkoušek dostupné v literatuře. Porovnáme-li žárupevnost martenzitických ocelí P91, P92 a CB2, dojdeme k závěru, že evropská ocel CB2 se jeví jako nejvhodnější pro výrobu částí, provozovaných dlouhodobě do teploty 620 °C. Dále byl vyhodnocen i vliv svařování na ocel CB2. Pokles žárupevných vlastností byl velmi mírný a projevoval se až při vysokých parametrech zkoušení.

Tabulka 1: Chemické složení lité ocele CB2 [hm. %]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	V	Nb	Al	B	N	Ti	H
min.	0,120	0,2	0,8			0,1	9,0	0,9	1,40	0,18	0,05	0,010	0,008	0,015		
max.	0,140	0,3	1,0	0,010	0,005	0,2	10,0	1,1	1,60	0,22	0,07	0,020	0,015	0,030	0,005	
472988	0,13	0,26	0,87	0,008	0,005	0,17	9,35	0,95	1,48	0,19	0,057	0,01	0,009	0,0179	0,002	2,9ppm



Tabulka 2: Tepelné zpracování ocele CB2

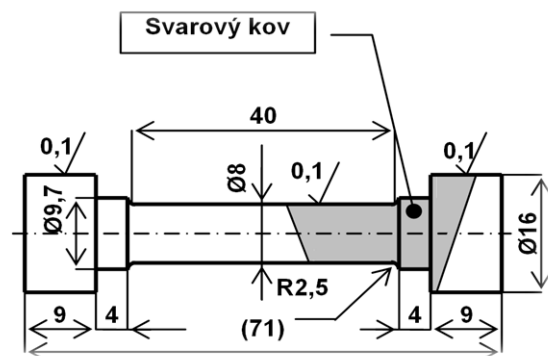
Před svařením			Po svaření
Předběžné TZ	Kalení	Popouštění	Žihání
1070 °C/13 h/pec	1100 °C/14 h/int. vzduch	740 °C/12 h/vzduch	740 °C/10 h/vzduch

Tabulka 3: Zjištěné hodnoty materiálových konstant

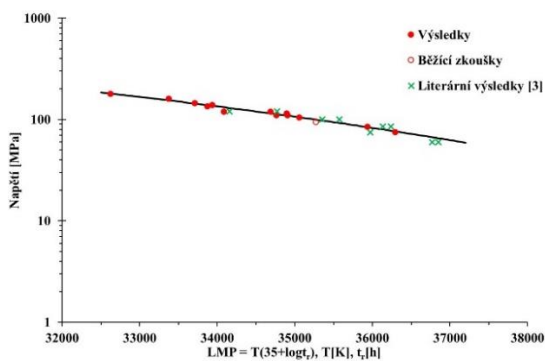
	A1	A2	A3	A4
ZM	0,151521	0,000213	-4,56721E-09	35
SS	-4,99449	0,000517	-9,0418E-09	35



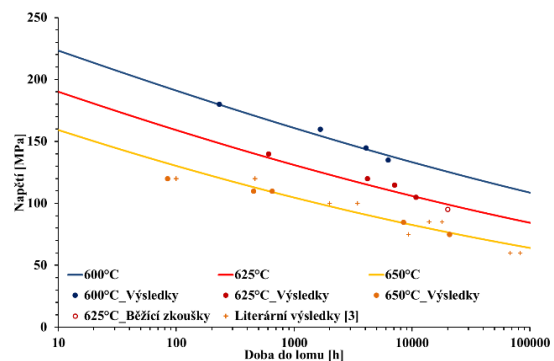
Obr. 5: Odlitek z martenzitické oceli



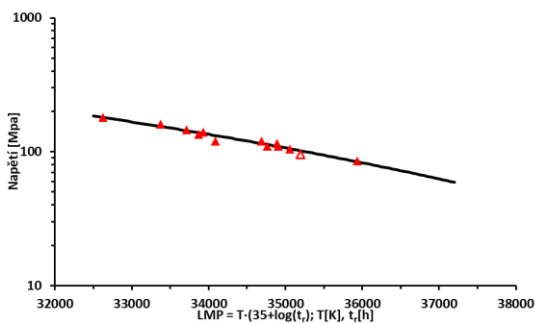
Obr. 6: Rozměry vzorku se svařem



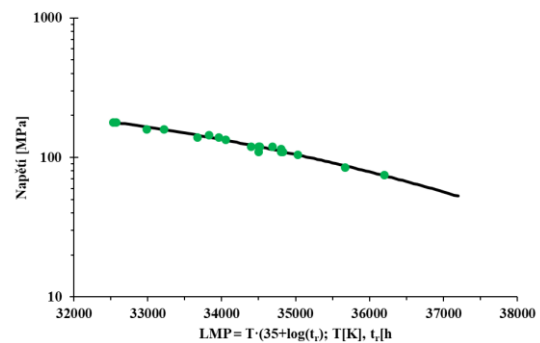
Obr. 3: Závislost napětí na Larson – Mille-rově parametru



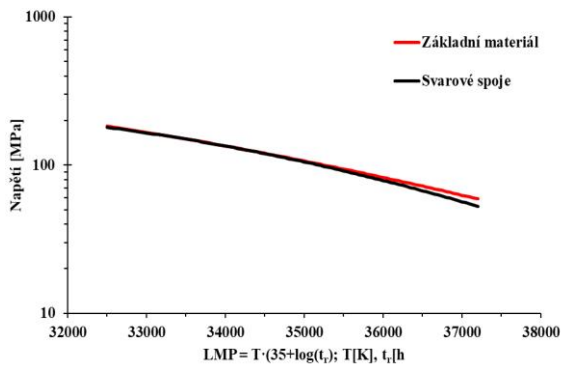
Obr. 4: Závislost napětí na době do lomu a teplotě



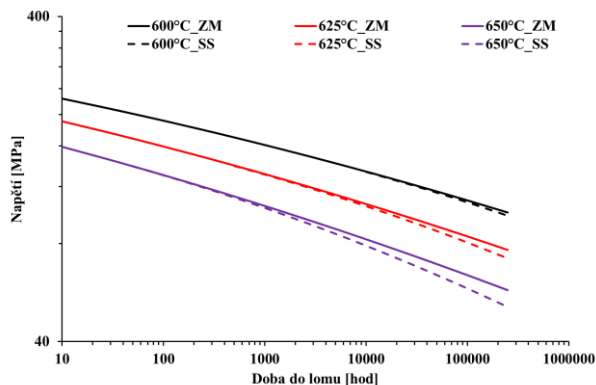
Obr. 5: Žárupevnost tavby 472988



Obr. 6: Žárupevnost svařových spojů tavby 472988



Obr. 7: Pokles žárupevnosti svarových spojů



Obr. 8: Snižování žárupevnosti ocele CB2 vlivem teploty a doby použití

## Literatura

- [1] Staubli, M., Hanus, R., Weber, T., Mayer, K-H., Kern, T-U. (2006): *The European efforts in development of new high temperature casting materials – COST 536*. Materials for Advanced Power Engineering. Jülich, Vol. 53, Part II, pp. 855-870.
- [2] Neumanová, Š., Čech, J., Vlasák, T., Hakl, J., Havelková, L. (2017): *Mechanické vlastnosti martenzitické ocele CB2*. Sborník konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Srní.
- [3] Kasl, J., Jandová, D. (2014): *Metalography of CB2 Steel Used for Cast Turbine Components*. Materials Science Forum, Vol. 782, p. 179.
- [4] Kimura, K., Tabuchi, M., Takahashi, Y., Yoshida, K., Yagi, K. (2011): *Long – term creep strength reduction factor for weld joints of ASME grades 91, 92 and 122 types steels*. International Journal Microstructure and Material Properties. Vol. 6., No. 1, p. 72.

# NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ HLOUBKY TRHLIN STŘÍDAVOU POTENCIÁLOVOU METODOU

## DESIGNING OF A DEVICE FOR CRACK DEPTH MEASURING USING ACPD METHOD

Jakub Mlnářík, Petr Chuchvalec a Jan Kec

SVÚM a.s.

### Abstrakt

Potenciálová metoda se již desetiletí využívá zejména v mechanických zkušebnách pro měření rychlosti růstu trhlin. Během zkoušky prochází vzorkem stejnosměrný nebo střídavý proud. Trhliny a nehomogenity na vzorku způsobují nárůst lokálního odporu a tím větší úbytek napětí. Potenciálové metody jsou velmi vhodné k provozním aplikacím (přístroje pro měření hloubky trhlin, monitorování stability známých trhlin během provozu, měření tloušťky stěny...).

Ačkoli princip metod je relativně jednoduchý, reálná aplikace bývá spojena s různými obtížemi. Stejnosměrná metoda obvykle vyžaduje průchod velmi vysokých proudů a vyhodnocení bývá matematicky náročné, střídavá metoda je naopak náchylná k rušení a ke vzniku rušivé indukované složky v signálu. Většímu rozšíření potenciálových měření také brání vysoká cena komerčních produktů. Cílem naší práce je zhodnotit možnosti střídavé potenciálové metody pro stanovení hloubky trhlin a navrhnout levné zařízení pro laboratorní i provozní podmínky.

### Abstract

Potential Drop (PD) techniques have been used for decades, especially in mechanical laboratories for monitoring crack growth. During the test AC/DC currents are injected in the specimen. Defects generally increases local resistance and hence the measured voltage drop. The PD techniques are also great for in field applications (devices for crack depth measuring, monitoring stability of a known crack during operation, long-term wall thickness measurement...).

However, while the principle underlying these techniques is relatively simple, some difficulties have been encountered in their practical applications. Many commercial systems based on PD methods, for instance, require the injection of very large currents in order to obtain sufficiently large signals, or have problems with stability, interferences and electrical noise... And commercial systems are nowadays very expensive. The aim of this work is to evaluate the capabilities of ACPD technique for crack sizing and design a simple and low-cost device for laboratory and also in-field crack measuring.

### Úvod

Hlavní rozdíl mezi stejnosměrnou a střídavou metodou potenciálového měření je charakter rozložení proudu ve vzorku. Při průchodu stejnosměrného proudu platí, že proud prochází rovnoměrně celým průřezem vzorku (obr. 1). Střídavý proud vyvolává tzv. skin efekt, kdy jsou vlivem indukovaného magnetického pole elektrony vytlačovány od středu vzorku směrem k jeho povrchu. Hloubka skin efektu (tedy pomyslná slupka, kterou prochází elektrický proud) je závislá na frekvenci střídavého proudu. Hlavní výhody střídavé metody jsou:

- koncentrace proudu na povrchu vzorku (vyšší citlivost při nižších proudtech),
- lineární závislost úbytku napětí přes trhlínu na hloubce trhlíny ve velkém rozsahu,
- eliminace stejnosměrných rušivých složek (např. termoelektrické napětí).

## Měřicí aparatura

Byla zrealizována pokusná měřicí aparatura pro základní seznámení se ACPD měřením hloubky trhlin (obr. 2). Střídavý budící proud je získán pomocí přeladitelného sinus generátoru se zesilovačem. Budící proud ve vzorku může ve špičkách dosahovat až 5 A. Měřený signál je zesílen v předzesilovači s nastavitelným ziskem. Po odfiltrování parazitních frekvencí je signál na A/D převodníku digitalizován a počítačově zpracován. Měření probíhá pulzně – proud prochází vzorkem jen krátkou dobu (max. 100 ms) během měření. Zařízení disponuje celkem 8 měřicími kanály. Vodiče k vedení budícího proudu a vodiče k měření potenciálového spádu jsou důsledně stíněny pro omezení parazitní indukované složky.

## Měření na umělých trhlínách, únavová zkouška

Na plechu z uhlíkové oceli o tloušťce 10 mm byly vyfrézovány umělé trhliny o hloubce 1, 3, 4 a 5 mm v délkách 10, 20 a 30 mm. Pro měření potenciálového spádu byla zhotovena ruční příkládací sonda se 4 kontakty (obr. 2). Vnější kontakty slouží k zavedení el. proudu, vnitřní k měření úbytku napětí. Kontakty byly zhotoveny z pružinového drátu o průměru 0,3 mm. Sonda byla střídavě příkládána přes modelové trhliny a mimo trhliny pro stanovení referenčního stavu. Měření bylo provedeno při několika frekvencích.

Výsledky měření při jednotlivých frekvencích jsou na obr. 3 až obr. 7. V grafech je vyneseno poměr naměřeného úbytku napětí přes trhlinu / napětí mimo trhlinu v závislosti na hloubce umělé trhliny. U frekvencí do 100 a 500 kHz se v souladu s očekáváním příliš neprojevuje skin efekt, což se projevuje nelineární závislostí signálu na hloubce trhliny. Od frekvence 1000 Hz již tato závislost lineární je pro trhlinu o délce 30 mm. Kratší trhliny s větší hloubkou vykazují výraznou odchylku od lineárního chování. Elektrický proud se totiž nešíří jen příčně přes trhlinu do hloubky vzorku, ale částečně trhlinu obchází na povrchu. Tento nežádoucí proud roste s hloubkou trhliny a s klesající délkou trhliny.

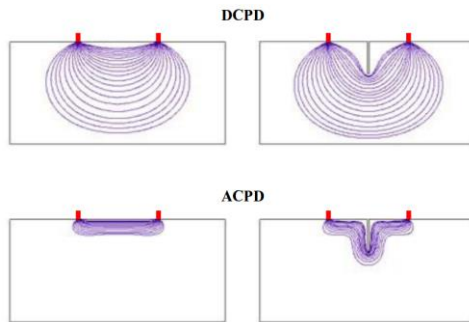
Na obr. 8 je znázorněna závislost odchylky od linearitu v závislosti na poměru hloubka/délka trhliny. Je zjevná podobná závislost pro všechny měřené frekvence. Závislost lze interpolovat např. polynomem 2. stupně.

Komerční příruční přístroje pro měření hloubky trhlin obvykle spoléhají na 1-2 bodovou kalibraci na kalibračním bloku a zanedbávají nelinearitu u krátkých trhlín. Pokud jsou tedy měřeny trhliny krátké, ale s velkou hloubkou, je výsledek zatížen značnou chybou a měřená hloubka trhliny je podhodnocena. V praxi bývá obvykle možné alespoň orientačně stanovit délku trhliny a tu zadat jako vstupní parametr, což při vhodné kalibraci výrazně zpřesní měřenou hodnotu.

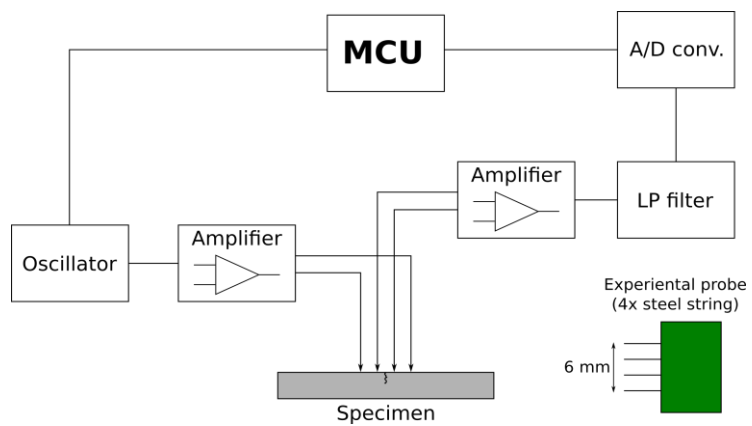
Dalším experimentem bylo měření růstu trhliny vzorku při únavové zkoušce (obr. 9). Cílem bylo cyklovat ostrou trhlinu dané hloubky pro další mechanickou zkoušku. Zkouška započala na vzorku s umělým vrubem 7,8 mm. Po počátečním rychlém nárůstu trhliny byla snížena frekvence cyklování (čas 200 s). V čase 580 s byl vzorek uvolněn (patrná relaxace) a znovu zatížen s jinou amplitudou cyklování. Po dosažení hloubky 11 mm byl vzorek demontován. Po doložení vzorku byla potvrzena shoda skutečné hloubky s naměřenými údaji.

## Závěry

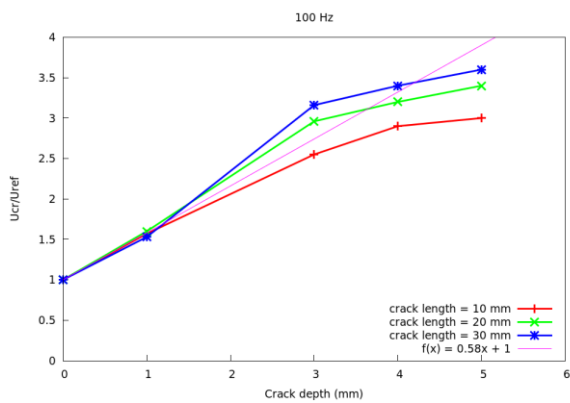
- Byla navržena a zrealizována experimentální aparatura pro měření metodou ACPD.
- Možnost kalibrace a reprodukovatelnost metody byla ověřena měřením na modelových trhlínách.
- Zařízení bylo prakticky využito při cyklování trhliny dané hloubky na únavovém stroji.



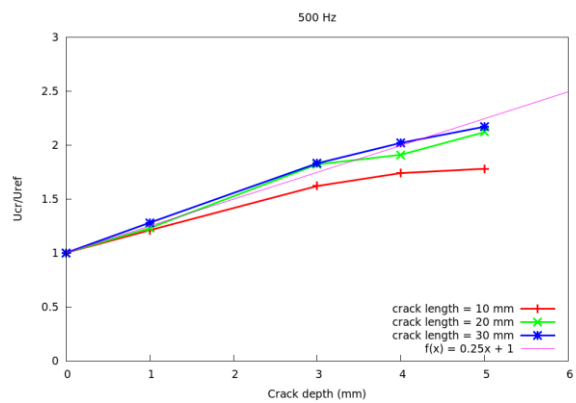
Obr. 1: Schematické porovnání elektrického pole při stejnosměrné a střídavé metodě



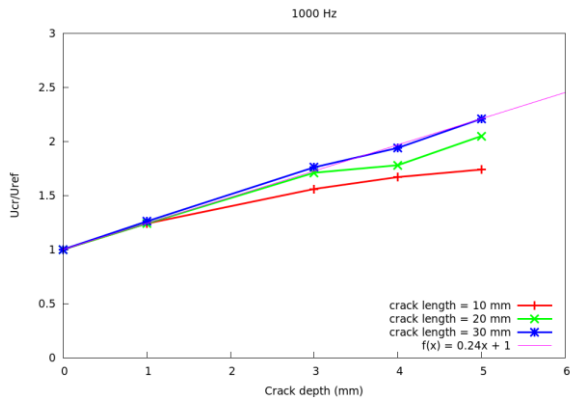
Obr. 2: Uspořádání experimentální měřicí aparatury



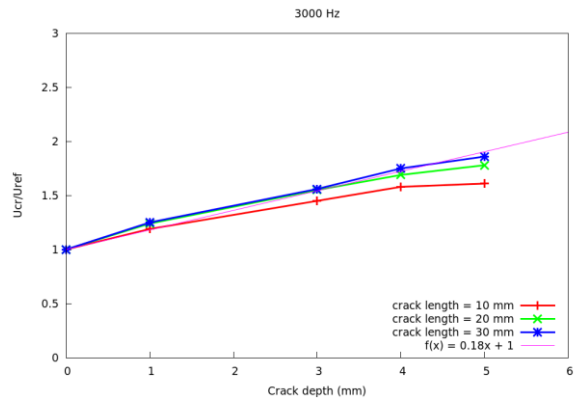
Obr. 3: Umělé trhliny – 100 Hz



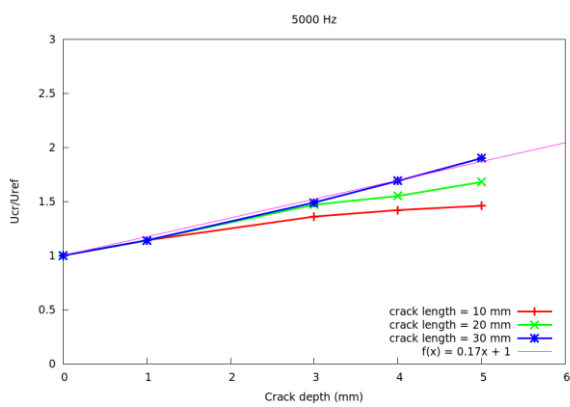
Obr. 4: Umělé trhliny – 500 Hz



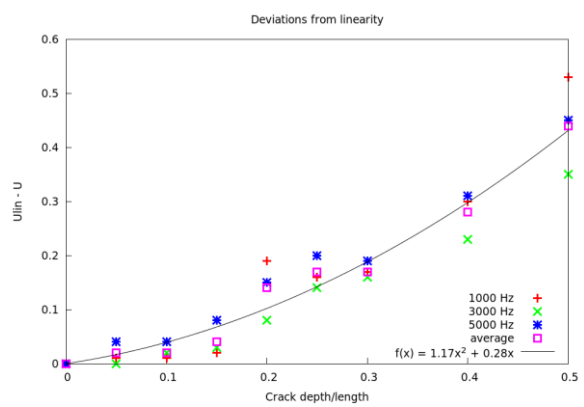
Obr. 5: Umělé trhliny – 1000 Hz



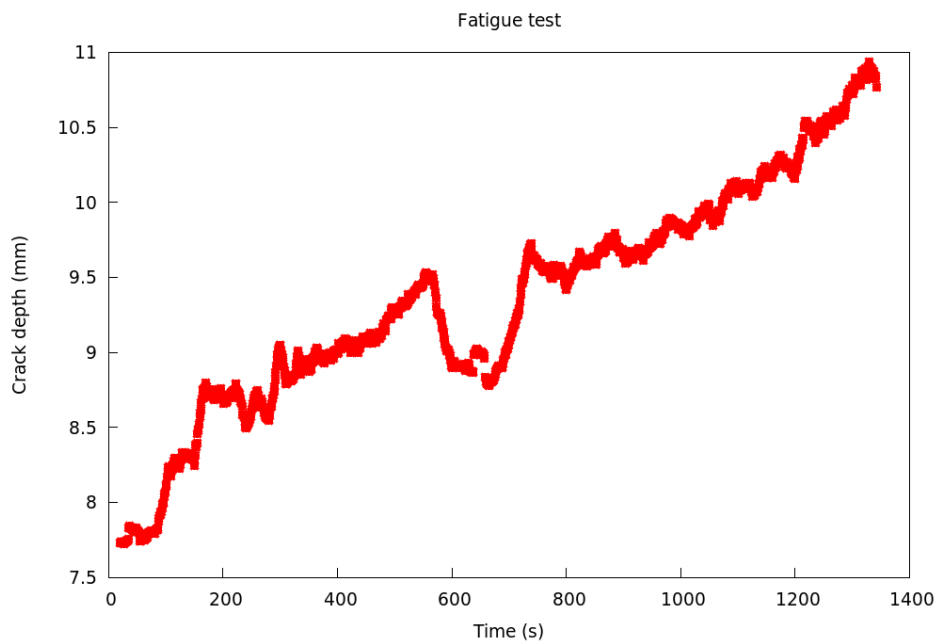
Obr. 6: Umělé trhliny – 3000 Hz



Obr. 7: Umělé trhliny – 5000 Hz



Obr. 8: Odchyly od linearity



Obr. 9: Růst trhliny při únavovém zatěžování

# ŽIVOTNOST LOPATEK PARNÍCH TURBÍN

## BLADES LIFETIME OF STEAM TURBINES

Miroslav J. Černý

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 16608 Praha 6

### Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou životnosti lopatek parních turbín vzhledem k únavové korozi a možné tvorbě trhlin. Vliv kombinace dynamického zatížení a koroze na tvorbu únavových trhlin.

### Úvod

Diverzifikace výrobních metod energie v rámci stávajících rozvodných sítí zvyšuje požadavek na operační pružnost elektráren využívající parní turbíny.

Aktuální požadavky na provoz moderních fosilních zdrojů jsou do velké míry ovlivněny rychle vzrůstajícím podílem obnovitelných zdrojů, které jsou ze své podstaty nestabilní. To klade nové požadavky na provoz klasických zdrojů s parní turbínou, které se stále využívají i u obnovitelných zdrojů. Mezi hlavní provozní požadavky patří zejména flexibilita provozu, okamžitá dostupnost výkonu, dlouhodobý bezpečný provoz na částečných a minimálních výkonech při zachování vysoké účinnosti nebo vysoký počet startů turbíny s krátkými najížděcími časy.

To vede k situaci, kdy parní turbíny mohou pracovat s velmi nízkými objemovými průtoky (NN) po delší dobu. Za provozních podmínek, kdy je objem průtoku v poslední fázi nízkotlaké části (LP) parní turbíny (obr. 1) pod určitou hranicí, energie se vrací do pracovního média, spíše než by byla extrahována. Tak nazývaný jev „ventilace“ může produkovat non-synchronní aerodynamické excitace, které mohou vést k vysokému dynamickému zatížení lopatek.

Nesynchronní buzení za normálního i nízkého operačního objemu může být velké riziko pro mechanickou odolnost lopatek v nízkotlaké části (LP) parní turbíny. V současné době rozsáhlé ověřování platnosti nových projektů vyžaduje objasnění, zda jsou lopatky vystaveny riziku nepřijatelných vibrací. Obvykle jsou tyto zkoušky provedeny na konci návrhu lopatek.

Pokud dojde k rezonanci a porušení lopatek, nákladná renovace je nutná, což může vést také ke snížení výkonu. Je proto velký zájem o správnou predikci neustáleného proudění a jeho účinků.

### Buzení lopatek

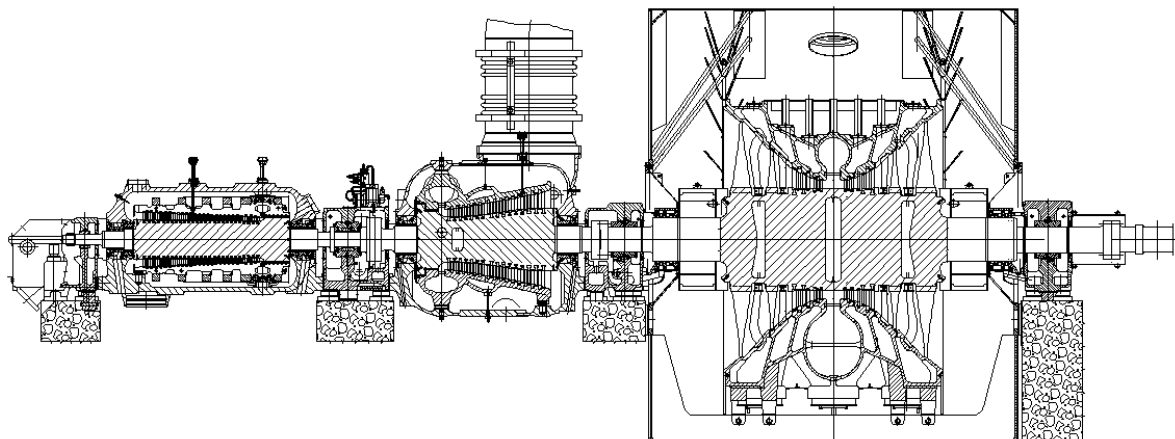
#### Synchronní buzení

Nejčastěji uvažované buzení v turbosoustrojí při libovolném provozním režimu je synchronní v důsledku nedokonalostí obvodové symetrie apod. Protože vlastní frekvence lze předpovídat poměrně dobře, poslední lopatky v nízkotlaké části (LSMB) jsou navrženy tak, aby byly mimo rezonance od rotační frekvence až do pátého a desátého řádu (násobek rotační frekvence).

#### Nesynchronní buzení

Naproti tomu rezonanční nesynchronní buzení je obtížnější předpovědět, a proto je obtížné se mu vyhnout. Takové buzení může být přítomno v širokém frekvenčním rozsahu. Ačkoli buďící síly mohou být malé, v případě rezonance mohou vznikat velká dynamická napětí v lopátkách, kde je tlumení nízké. Kromě toho aero-elastická nestabilita může vzniknout, pokud vibrace lopatky jsou zesilovány výsledným polem neustáleného proudění. Tento jev se nazývá flutter.





Vysokotlaká část  
(HP) turbína

Středotlaká část  
(IP) turbína

Nízkotlaká část  
(LP) turbína

Obr. 1: Schéma parní turbíny

### Turbulence

Turbulentní proudění je nepravidelné se změnami rychlosti závislými na místě a čase, proudnice se navzájem promíchávají. Částice media vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Jedno měření tudíž neposkytuje přesně opakovatelné výsledky. Výsledek je jinými slovy stochastický. Kromě toho je turbulentní proudění nestabilní a trojrozměrné, a protože při turbulentním proudění nechybí rotace, viskozita proudícího media má velký význam. Výskyt turbulence je typický pro proudící media s vysokým Reynoldsovým číslem.

### Flutter

Flutter je aeroelastická nestabilita, která se vyskytuje u mnoha typů turbosoustrojí a může vést k selhání lopatek. Původně malé pohyby lopatek mění okolní proud tak, že nestabilní síly proudu, působící na lopatku zesilují vibrace.

Flutter spočívá ve škodlivém přenosu energie proudící páry do lopatkové mříže, vzniku rezonance a rozvoje mechanického poškození lopatkování turbíny.

Navíc provozní rozsah je omezený maximálním hmotnostním tokem. To je dané tím, že nestabilní tlakové síly působící na lopatku se mění lineárně s hustotou media. Strukturální tlumení se uvažuje konstantní v celém provozním rozsahu při konstantní rychlosti rotoru. To znamená, že pokud je lopatka aerodynamicky nestabilní mechanické tlumení bude dostatečně bránit vibraci lopatky do určitého hmotnostního průtoku. Kritickou oblastí flutteru je typicky oblast s vyšším hmotnostním tokem.

### Hlavní korozní problémy parních turbín

Hlavní korozní mechanismy, působící v parních turbínách jsou: **korozní únava** (corrosion fatigue – CF), **korozní praskání** (stress corrosion cracking – SCC), **důlková koroze** (pitting) a **eroze-koroze** (erosion-corrosion) [1].

Důlková koroze a korozní únava lopatek turbín a koroze pod napětím (korozní praskání) jsou v současné době nejdůležitější problémy.

Je zřejmé, že některé stupně šíření koroze mají statistickou povahu pro řadu korozních událostí. Předpokládá se, že repasivace důlkové koroze probíhá náhodně. Statistická povaha jevu se uvádí pro postupnou nukleaci koroze a přechod na trhliny.

SCC a CF poškození se inicializuje v nízkotlaké části parní turbíny ve vysoce lokalizovaných oblastech, obvykle v důlcích koroze jako koncentrátorech napětí. Stádia jsou: akumulace

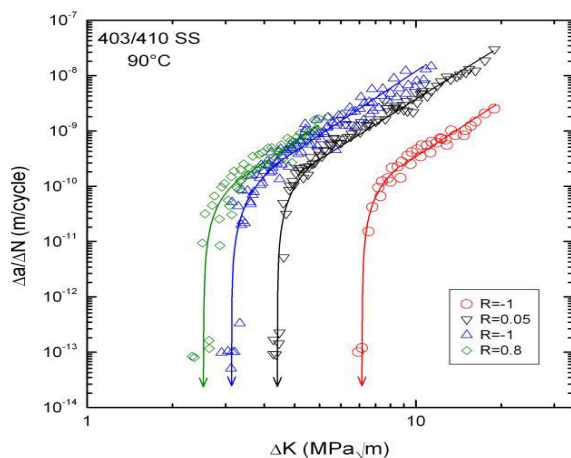
vané poškození metastabilních důlků na stabilní důlky, růst stabilních důlků, přechod důlků na trhliny, růst subkritických trhlín, a nakonec nestabilní porušení.

Mezi významnou korozi patří oxidace při vysokých teplotách, která obvykle vede ke snížení průřezu součásti. Tepelný přestup se potom zhorší a může způsobit lokální přehřívání materiálu a jeho urychlenou degradaci působením zvýšené teploty. Dále zde může působit abrazivní působení uvolněných částic oxidických vrstev na vnitřní povrchy součástí konstrukce při jejich unášení médii. Důležitá je oxidace vnitřních povrchů materiálů používaných v prostředích s nadkritickými parametry páry (vysokolegovaná-chromová ocel) v závislosti na kvalitě a provozních parametrech páry a na odolnosti použitého materiálu.

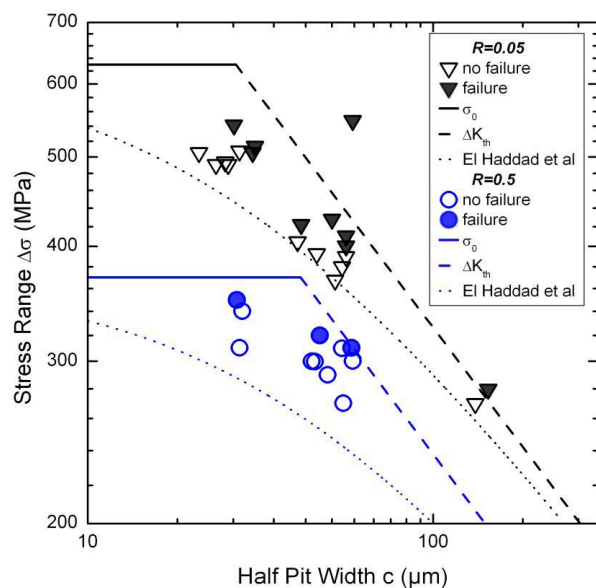
### Problémy životnosti lopatek parních turbín

Požadavky na kvalitní servis, přesnou diagnózu, načasované opravy a zlepšování materiálů a provozu parních turbín vedou k systematickému výzkumu iniciace a šíření trhlín, porušení a odhadu životnosti částí turbín, včetně lopatek za normálních podmínek a za resonance. Koncové lopatky NT části turbíny (L-1) přenášejí vysoké alternující napětí, expozici při vysokých teplotách a mechanické síly při opakovaných poměrných deformacích cyklického zatížení. Lopatky také přenášejí určité obvodové (centrifugální) síly, které jsou v kombinaci s alternujícím napětím odpovědné za únavové poškození. Životnost nejvíce exponovaných (posledních L-1) lopatek je dána kombinací účinků sil, působících na lopatky parní turbíny a vlastností materiálu při daných korozních podmínkách.

Pro hodnocení vlivu důlkové koroze na únavové vlastnosti materiálu se obvykle používá lineární lomová mechanika. Bylo pozorováno, že většina korozních důlků má přibližně semi-eliptický tvar se šířkou  $2c$ , a hloubkou  $a$ . Následný výzkum ukázal, že korozní důlky mohou být uvažovány jako polokruhové povrchové trhliny s uvedenými rozměry. S použitím této aproximace a za předpokladu, že rozměry korozního důlku jsou malé vzhledem k vytvořeným trhlinám, může být stanoven faktor intenzity napětí, FCGR diagram (obr. 2) a na konec Kitagawa-Takahashi (K-T) diagram (obr. 3) pro danou legovanou ocel. K-T diagram koreluje korozní důlek s únavovou trhlinou. Data mohou být získána pro specifické hodnoty  $R$  (alternující napětí). Ve výsledku mohou být použity K-T diagram pro odhad únavové meze a životnosti korodovaných částí lopatek parních turbín.



Obr. 2: FCGR Diagram



Obr. 3: Kitagawa-Takahashi Diagram

Příspěvek byl vytvořen v rámci grantového projektu TE01020068.

## Literatura

- [1] Černý, M. (2014): *Damage and Localized Corrosion in Steam Turbines*. Conference EAN 2014, Proceedings.
- [2] Černý, M. (2014): *Korozní poškození legovaných ocelí v parních turbínách*. 9. konference Zvyšování životnosti component energetických zařízení v elektrárnách, Srní, 2014.
- [3] Černý, M. (2015): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Conference EAN 2015, Proceedings.
- [4] Černý, M. (2016): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 827 (2016), Trans Tech Publications.  
doi:10.428/www.scientific.net/AMM.827.177.
- [5] Černý, M. (2016): *Modeling of Corrosion Fatigue Crack Initiation in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proc. EAN 2016, Srní.
- [6] Černý, M. J. (2017): *Modeling of Corrosion Fatigue Damage in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proc. EAN 2017, Nový Smokovec, Slovakia.

# OPTIMALIZACE ÚDRŽBY OCHRANNÝCH NÁTĚRŮ PRŮMYSLOVÝCH KOMÍNŮ A CHLADÍCÍCH VĚŽÍ

## OPTIMIZING MAINTENANCE OF PROTECTIVE COATINGS OF INDUSTRIAL CHIMNEYS AND COOLING TOWERS

Jana Marková<sup>a)</sup>, Jan Mlčoch<sup>a)</sup>, Miroslav Sýkora<sup>a)</sup>, Kamil Prešl<sup>b)</sup> a Jan Molnár<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

<sup>b)</sup> ČEZ, a. s.

### Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na posouzení vlivu ochranného nátěru na životnost železobetonových komínů a chladících věží. S využitím pravděpodobnostních metod a dat o hloubce karbonatace sledovaných na referenčních plochách je možné predikovat karbonataci a rozvoj koroze výztuže a přizpůsobit plán údržby. Cílem je optimalizovat opravy ochranných nátěrů k zajištění požadavků uvedených v metodických postupech ČEZ, a. s.

### Abstract

The study investigates the effect of protective coatings on the service life of reinforced concrete chimneys and cooling towers. Probabilistic methods and carbonation depth measurements make it possible to predict carbonation ingress and development of corrosion, and adapt maintenance plans. The aim is optimised use of protective coatings to meet the requirements provided in the procedures of ČEZ, a. s.

### Úvod

Železobetonové konstrukce jako komíny a chladící věže (CHV) jsou vystaveny nepříznivým vlivům prostředí. Koroze vyvolaná karbonací betonu jedním z hlavních degradačních faktorů. Během karbonatace dochází vlivem chemických reakcí uhličitánů ze vzduchu a portlanditu obsaženého v betonu k postupnému klesání hodnoty pH betonu krycí vrstvy, což vede k depasivaci výztuže a její korozi. Průběh karbonatace je popsán například ve *fib* Model Code 2010, nebo zvláště pro konstrukce v energetice ve směrnici IAEA [1], kde je uvažován i vliv ochranného nátěru komínu na rychlost karbonatace. V tomto příspěvku jsou s využitím pravděpodobnostních metod optimalizovány náklady spojené s údržbou povrchových částí železobetonových komínů a CHV. V EN 1990 je pro běžné typy konstrukcí včetně průmyslových uvedena návrhová životnost 50 let, v mezinárodním dokumentu ISO se předpokládá životnost 40 let [2].

### Srovnání výsledků monitoringu a teoretických modelů pro rychlost karbonatace

Analýza vychází z dat ze čtyř komínů tepelných elektráren v ČR. Na obr. 1 jsou znázorněny průměrné hodnoty hloubky karbonatace měřené na vnějším povrchu komínů po dobu 50 let. Z naměřených dat je možné odhadnout pravděpodobnostní parametry pro popis rozvoje hloubky karbonatace  $D$ . Data pochází z referenčních ploch umístěných po celé výšce komínů.

Na obr. 1 je naznačen model rychlosti karbonatace pro komíny (každý bod ukazuje průměr  $\mu$  z pěti měření a šipky udávají interval  $\pm$  směrodatnou odchylku  $\sigma$ ) – vychází se ze vztahu:  $D(t) = a \sqrt{t}$ , kde  $t$  je stáří konstrukce v letech. Konstanta  $a = 4,5$  mm/ $\sqrt{\text{rok}}$  byla získána metodou nejmenších čtverců. Model popsáný na obr. 1 nezohledňuje vliv ochranných nátěrů na rychlost karbonatace. Model IAEA [1] zahrnuje vliv nátěru pomocí koeficientů  $\beta$  ( $\beta = 1$  pro konstrukci bez ochranného nátěru,  $\beta = 0,8$  pro konstrukci s funkčním ochranným nátěrem). Tento předpoklad přibližně odpovídá výsledkům uvedeným v [4], kde byly pro ochranné nátěry na akrylátové bázi (obvykle používané pro komíny a CHV) naměřeny přibližně o 20 % nižší hodnoty hloubky karbonatace.

Pro krycí vrstvu betonu a rychlost karbonatace je v tomto případě uvažováno normální rozdělení. Z měření byly získány variační koeficienty pro krycí vrstvu  $V_c = \sigma_c / \mu_c \approx 0,2$  a pro rychlost karbonatace  $V_D(t) = \sigma_D(t) / \mu_D(t) \approx 0,4$ ; časově nezávislý  $V_D$  dobře odpovídá dlouhodobým měřením [3].

### Optimalizace údržby

Studie vychází z předpokladu, že dřík komínu je chráněn vhodným ochranným nátěrem. Údržba železobetonových komínů závisí na životnosti ochranného nátěru. Podle studie [5] lze předpokládat, že nátěr ztratí ochranné vlastnosti po přibližně 15 letech. Obnova nátěru se běžně provádí po 10 letech. Následující scénáře údržby vycházejí z diskusí s provozovateli elektráren:

- Scénář S0 – bez aplikace ochranného nátěru během provozu komínu,
- Scénář S1 – nový nátěr po 10 letech od uvedení do provozu,
- Scénář S2 – nový nátěr po 10 a po 20 letech,
- Scénář S3 – nátěr obnovovaný každých 10 let.

Předpokládaný rozvoj karbonatace podle jednotlivých scénářů je znázorněn na obr. 2a. V souladu s metodikou uvedenou v [6] by měl být komín opraven (obnova krycí vrstvy v poškozených oblastech, očištění povrchu konstrukce pískováním a nanesení nového ochranného nátěru na celý povrch komínu), pokud plocha zasažená viditelnou korozi a trhlinami dosáhne 30 % povrchu. Průměrná doba mezi okamžikem, kdy zkarbonatuje krycí vrstva a začne koroze, a okamžikem prokreslení trhlin na povrchu se odhaduje na  $\Delta t \approx 5$  let [7].

Index spolehlivosti pro mezní stav  $c = D(t)$  lze získat z následujícího vztahu:

$$\beta(t) = [\mu_c - \mu_D(t)] / \sqrt{[\sigma_c^2 + (V_D \mu_D(t))^2]}, \quad (1)$$

kde  $\mu_c$  a  $\sigma_c$  značí střední hodnotu a směrodatnou odchylku krycí vrstvy [mm] a  $\mu_D(t)$  je průměrná hodnota hloubky karbonace [mm]. Plochu, která byla zasažena trhlinami způsobenými korozi výztuže, lze získat ze vztahu:

$$a_{kor}(t) = \text{Prob}[c < D(t-\Delta t)] = \Phi[-\beta(t-\Delta t)], \quad (2)$$

kde  $\Phi$  je kumulativní distribuční funkce normalizovaného normálního rozdělení. Na obr. 2b je znázorněna relativní plocha zasažená korozi v závislosti na čase  $t$ ; mezní hodnotou pro zahájení opravy se uvažuje  $a_{kor} = 0,3$ .

### Příklad optimalizace údržby

Optimalizace údržby je provedena podobně jako ve studii [8]. Optimalizace nezahrnuje první nátěr, jeho náklady jsou zahrnuty v nákladech na výstavbu. Uvažují se dva druhy nákladů:

- $C_{plášť}$  – náklady na  $m^2$  obnovení nátěru – odstranění původního a nanesení nového nátěru,
- $C_{koroze}$  – náklady na  $m^2$  odstranění krycí vrstvy v oblastech zasažených trhlinami v důsledku koroze výztuže, očištění výztuže a oprava krycí vrstvy.

Na základě diskusí s provozovateli nejsou uvažovány náklady spojené s neplánovanou odstávkou, neboť opravy komínů se provádějí v období pravidelných (plánovaných) odstávek. Na základě analýzy nákladů se odhaduje  $C_{koroze} / C_{plášť} \approx 10$ . Celkové relativní náklady vztažené k nákladům na jednu aplikaci ochranného nátěru pro scénáře S0-S3 jsou:

$$C_{tot}(t)/(A C_{plášť}) = [n + a_{kor} C_{koroze} / (A C_{plášť})] \approx (n + 7 a_{kor} / A) \quad (3)$$

kde  $A$  je plocha povrchu komína [ $m^2$ ] a  $n$  počet aplikací nátěru během sledovaného období. Nátěr se aplikuje, pokud relativní plocha zasažená viditelnými trhlinami způsobenými korozi výztuže přesáhne mezní hodnotu 0,3.

Obr. 3 znázorňuje relativní náklady na opravy povrchu železobetonového komína v čase  $t$ . Z analýzy vyplývá, že při požadované životnosti komína 40 let je vhodné zvolit scénář S3, pro životnost 50 let scénář S0 a pro životnost 60 let představuje optimální strategii údržby scénář S1.

## Závěr

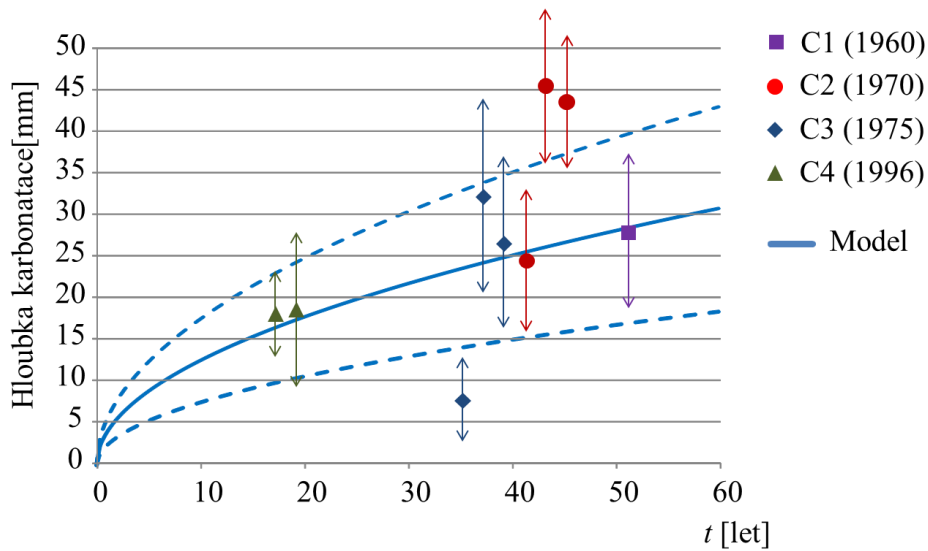
Výsledky studie poskytují podklady pro doporučení na plány údržby rozsáhlých železobetonových konstrukcí. Optimální scénář údržby závisí na požadované životnosti konstrukce (obr. 3). Například scénář, kdy se ochranná vrstva nátěru aplikuje po pravidelně každých 10 let, představuje optimální strategii pro životnost 40 let, která se běžně uvažuje při navrhování průmyslových komínů a CHV. Pro životnost konstrukce 50 let jsou minimální náklady na údržbu dosaženy, naopak k největším nákladům dochází při scénáři, kdy není na konstrukci nátěr obnoven a velká oprava je provedena, až když je 30 % povrchu zasaženo viditelnými projevy koroze.

## Poděkování

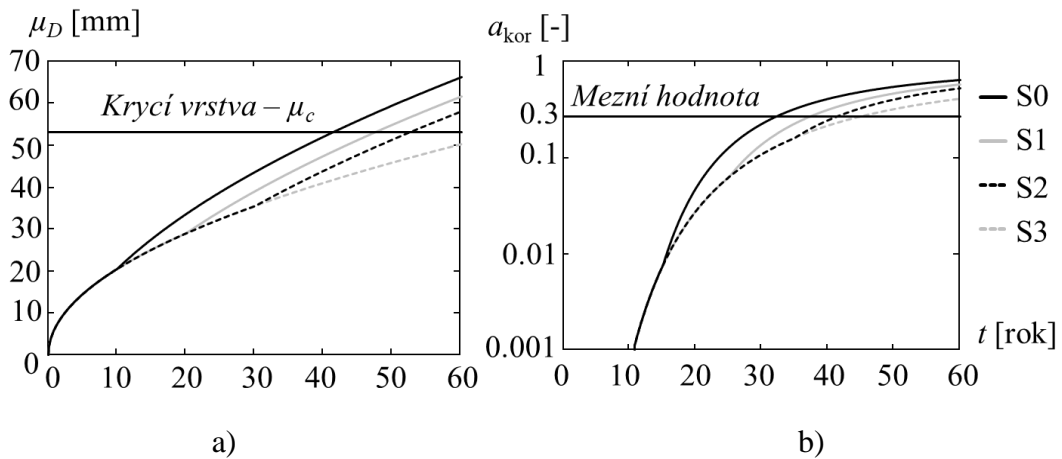
Příspěvek je součástí řešení centra kompetence TA ČR TE01020068 CESEN. Využily se také výsledky projektu SGS18/164/OHK1/2T/31 (Studentská grantová soutěž ČVUT v Praze).

## Literatura

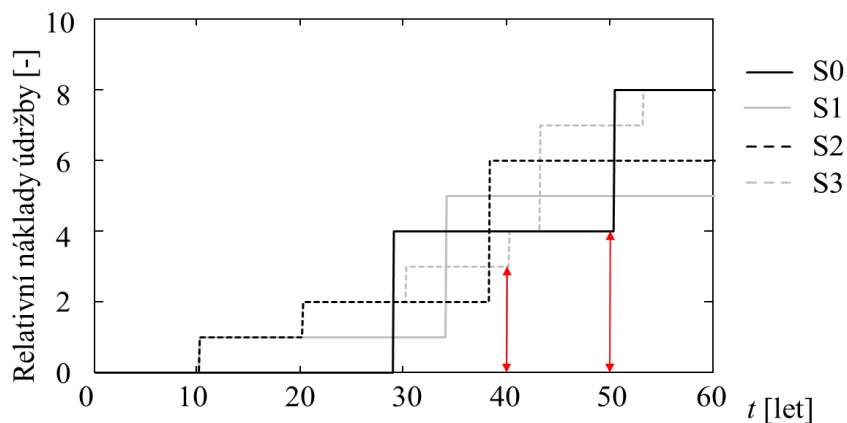
- [1] IAEA (2002): *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [2] ISO 16204:2012 *Durability — Service life design of concrete structures*.
- [3] Holický, M., Holická, N. (2006): *Probabilistic optimisation of concrete cover exposed to carbonation*. Proc. of the International RILEM-JCI Seminár, Ein-Bokek, Israel 2006, ISBN 2-912143-89-6, pp. 384-393.
- [4] Merah, A., Khenfer, M. M., Korichi, Y. (2015) *The effect of industrial coating type acrylic and epoxy resins on the durability of concrete subjected to accelerated carbonation*. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 29, No. 22, pp. 2446-2460. doi:10.1080/01694243.2015.1067004
- [5] Mozaryn, T., Kokowska, J. (2009): *The service life of coating systems applied on cooling towers – laboratory study and in-situ investigations*. RILEM Workshop on Long-Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management. ISBN 978-2-35158-072-1
- [6] Marková, J., Sýkora, M. (2014): *Metodické postupy pro odhad životnosti komínů a chladících věží*. Výzkumná zpráva č. 314120J000, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze.
- [7] JCSS (2001): *JCSS Probabilistic Model Code*, chapter Environmental Attack (periodically updated, online publication). Joint Committee on Structural Safety. www.jcss.byg.dtu.dk
- [8] Donadio, M., Fiúza, C., Taylor, D. (2013): *Life Cycle Assessment of Repair and Maintenance Solutions for Cooling Towers*, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, Wroclaw University of Technology, Poland.



Obr. 1: Hloubka karbonatice  $D$  v závislosti na stáří konstrukce  $t$  – měření a předpokládaný trend (průměr a směrodatná odchylka  $\pm$ )



Obr. 2: a) Předpokládaný vývoj karbonatice pro scénáře S0-S4, b) závislost relativní plochy povrchu konstrukce zasažené korozi  $a_{kor}$  na čase  $t$



Obr. 3: Relativní náklady na údržbu pro scénáře S0 až S3



# VYUŽITÍ METALOGRAFICKÝCH REPLIK PŘI NEDESTRUKTIVNÍ IDENTIFIKACI MATERIÁLU CHLADÍCÍCH KROUŽKŮ PRO DIESELGENERÁTORY JE DUKOVANY

## USE OF METALLOGRAPHIC REPLICA METHOD IN THE NONDESTRUCTIVE MATERIAL IDENTIFICATION OF COOLING INSERTS FOR DIESEGENERATORS IN DUKOVANY NPP

Petr Brabec a Dana Tonarová

ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

Na základě výsledků hodnocení dvou případů ztráty integrity chladících vložek pístu motoru při provozním zatížení dieselgenerátoru na EDU byla identifikována potřeba nedestruktivního ověření materiálového složení série náhradních chladících vložek. Úspěšně byla odzkoušena možnost rozlišení materiálů na základě mikrostrukturních charakteristik pomocí metalografických replik v případě, kdy posuzované materiály nelze jednoznačně rozlišit analýzou chemického složení. Metodika založená na bázi silikonových replik umožnila jednoznačnou identifikaci vyhovujících náhradních dílů.

### Abstract

The results of failure analysis of two cases of cooling insert damage inside dieselgenerator's engines, operated in Dukovany NPP, induced a need of positive material identification of spare parts by nondestructive evaluation method. Material identification on the base of microstructure, using metallographic replica method, was verified for these cases, when considered materials have similar chemical composition. The silicone metallographic replica method ensured secure positive material identification of spare parts.

### Úvod

V roce 2013 a 2017 došlo během periodického kontrolního spuštění záložního dieselgenerátorového napěťového zdroje k závadě motoru. Poškození motoru spočívalo v dezintegraci litinového chladícího kroužku koruny pístu. Analýza příčin poškození, prováděná ve Zkušební laboratoři oddělení Podpora provozu energetických zařízení ÚJV Řež, a. s., zjistila, že při výrobě havarovaných komponent byla použita litina s nízkými parametry mechanických vlastností. V rámci řešení problému bylo provedeno destruktivní materiálové hodnocení několika dalších provozně nepoškozených a záložních chladících kroužků. U všech srovnávacích vzorků bylo zjištěno použití litiny, příp. oceli s výrazně vyššími hodnotami pevnosti v tahu. Závěry analýzy vyvolaly potřebu ověření a zavedení metodiky pro nedestruktivní pozitivní materiálovou identifikaci (PMI) záložních a nově dodávaných chladících kroužků. Pro kontrolu litinových i ocelových kroužků byla využita metoda metalografických replik [1, 2].

### Hodnocení mikrostruktury pomocí replik

Mikrostruktura je jedním ze základních parametrů charakterizujících kovové materiály. Tradiční cestou ke studiu mikrostruktury materiálu je mikroskopické pozorování laboratorně připraveného leštěného výbrusu vzorku, který je z původního celku vyjmut destruktivní cestou. Pro situace, kdy není možné porušit integritu komponenty destruktivním odběrem vzorku, byla vyvinuta metoda metalografických replik. K odběru replik se vybírají místa, která nejsou ve funkčním kontaktu s jinou komponentou sestavy. Při přípravě povrchu pro odběr repliky dochází k nepatrnému zásahu do povrchové vrstvy. Povrch se připravuje standardizovanými postupy metalografického broušení, leštění (s využitím ruční rotační brusky) a leptáním [3]. Před samotným odběrem repliky je vhodné kvalitu přípravy povrchu kontrolovat přenosným metalo-

grafickým mikroskopem. Komerčně jsou dostupné dva odlišné typy sestav pro odběr metalografických replik. V obou případech je základním principem otisk topografie metalograficky připraveného povrchu do plastické vrstvy odběrové substance.

### **Metalografická replika typu „Transcopy“**

Odběrová sestava pro tradiční metodu přípravy metalografických replik je dostupná pod komerčním názvem „Transcopy“. Tenká fólie na bázi celulózy, opatřená z druhé strany odraznou hliníkovou vrstvičkou, se před aplikací aktivuje rozpouštědlem a přitiskne na vyleštěný a naleptaný povrch komponenty. Po ustálení se sejmutá replika nalepí na podložní sklíčko a je tak připravena k mikroskopickému hodnocení.

### **Silikonová metalografická replika**

Metoda silikonových replik, vyznačující se vysokým rozlišením detailů otisku, má široké uplatnění v oblasti kontroly kvality výroby, technických kontrol průmyslových zařízení, údržby, oprav a analýzy poškození komponent [4]. Speciální materiál „Microset 202“, určený pro odběr metalografických replik, dosahuje dle technické specifikace výrobku rozlišení detailu otisku 0,05 mikrometru. Dvousložková silikonová hmota je v tekutém stavu nanášena na zájmový povrch pomocí speciální dávkovací pistole. Polymerní hmota je mechanismem pistole ze zásobníku o objemu 50 ml vytlačována do slučovače, kde se před aplikací mísí s katalyzátorem. Rovinnou plastovou podložkou potaženou speciálním papírem se aplikovaná hmota přitiskne k odběrové ploše. Po několikaminutové polymeraci je možné repliku sejmout.

### **PMI litinových chladících kroužků**

Destruktivní analýza chladících kroužků, vyrobených z litiny, byla založena na hodnocení mikrostruktury, stanovení mechanických vlastností a chemického složení materiálu. Materiálová analýza posuzovaných chladících kroužků identifikovala několik typů litiny s odlišnou mikrostrukturou a rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Chemické složení zjištěných typů litiny bylo velmi obdobné a nebylo jej možné použít jako rozlišovací znak pro nedestruktivní PMI záložních kroužků. Pro potřebu nedestruktivního rozlišení vyhovujícího a nevyhovujícího materiálu záložních chladících kroužků bylo využito metody metalografických replik.

Litina havarovaných kroužků, která se vyznačuje nízkými hodnotami mechanických parametrů, se z metalografického hlediska mimo jiné odlišuje přítomností grafitu v podobě lupínek (litina s lupínkovým grafitem – LLG). Litiny nepoškozených provozovaných a záložních chladících kroužků s výrazně vyššími parametry mechanických vlastností v mikrostruktuře obsahují grafit červíkovitý či kuličkový (vermikulární litina s červíkovitým grafitem – LVG, tvárná litina s kuličkovým grafitem – LKG). Z hlediska PMI bylo důležité zvolenou nedestruktivní metodou spolehlivě identifikovat, že se v konkrétním případě materiálu posuzovaného kroužku nejedná o strukturu s lupínkovým grafitem, která odpovídá litině s nevyhovujícími mechanickými vlastnostmi.

Při testování metody metalografických replik na vzorcích litin byly pro srovnání odebrány otisky odběrovou sestavou Transcopy i Microset. Otisky byly sejmuty z leštěných metalografických výbrusů v neleptaném stavu a po naleptání Nitalem. Porovnáním výsledných replik v odrazovém světelném mikroskopu byla konstatována vyšší kvalita otisků odebraných silikonovou hmotou Microset 202. Tvar grafitových zrn, jakožto hlavní markant pro odlišení jednotlivých typů litiny, byl na silikonových replikách patrný i na neleptaných metalografických výbrusech na rozdíl od replik Transcopy (obr. 1). Po naleptání výbrusů zachycovaly tvar grafitu oba typy replik.

Pro další fázi testování, kdy byly repliky odebrány z povrchu chladících kroužků, byla vybrána silikonová replikační hmota. Polní metalografický výbrus byl na kroužcích prováděn na svislé vnější straně, kde není komponenta v sestavě motoru v kontaktu s jinou komponentou. Kvalita replik z ploch, které není možné připravit standardními postupy broušení a leštění na

stabilních laboratorních zařízeních je nižší, avšak je stále dostatečně průkazná z hlediska identifikace vyhovujícího typu litiny.

PMI záložních litinových kroužků byla provedena podle validovaného pracovního postupu. Při kontrole nebyla zjištěna ani v jednom případě litina s lupínkovým grafitem (LLG). Litina s nízkými parametry mechanických vlastností LLG byla v rámci všech analýz identifikována pouze u dvou havarovaných chladících kroužků provozovaných 30 let.

### **PMI chladících kroužků z oceli značky C45**

V rámci úkolu na řešení PMI chladících kroužků byly prověřovány materiálové specifikace nově vyrobených ocelových chladících kroužků, uvedené v jejich průvodním certifikátu. Pro destruktivní hodnocení byl k dispozici referenční vzorek deklarované tavby konstrukčního materiálu kroužků. Na referenčním vzorku bylo provedeno hodnocení mikrostruktury, stanovení chemického složení a měření tvrdosti materiálu.

Chemické složení vzorku bylo měřeno metodami optické emisní spektrometrie (OES) a rentgenfluorescenční analýzy (XRF). Chemická analýza potvrdila složení deklarované předloženým inspekčním certifikátem.

Mikrostruktura referenčního vzorku oceli značky C45 byla dokumentována ve třech navzájem kolmých směrech. K vyvolání mikrostruktury bylo použito chemického leptání roztokem Nital. Lamelární perlitická mikrostruktura s protáhlým feritickým zrnem vykazovala určité odlišnosti v obsahu a šířce zrn feritu v závislosti na orientaci řezu metalografických výbrusů. Z metalografických výbrusů byly sejmuty repliky metodou silikonových otisků. Z obr. 2 je patrná velmi dobrá reprodukce mikrostrukturních rysů na replice ve srovnání s originálním metalografickým výbrusem. Porovnání je usnadněno skutečností, že oba obrázky zachycují identickou oblast.

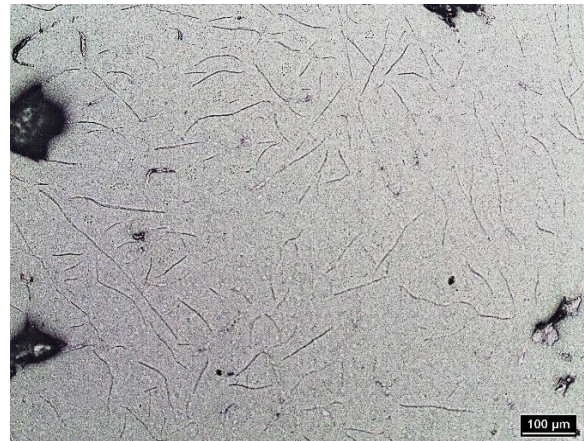
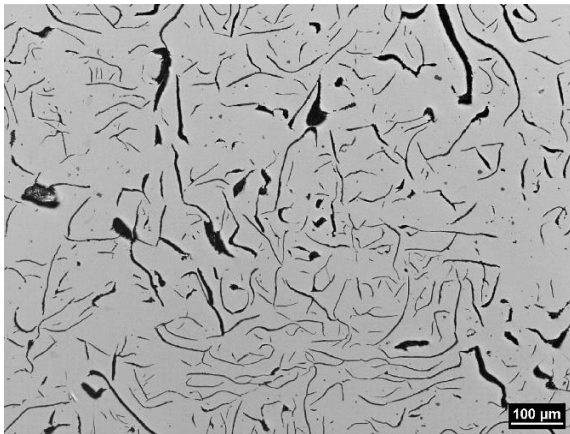
Pozitivní materiálová identifikace dle validovaného postupu byla prováděna na osmi kusech nových chladících kroužků. PMI byla založena na analýze chemického složení metodou XRF (nevyžaduje hrubé broušení povrchu na rozdíl od OES), odběru metalografických replik a měření tvrdosti přenosným tvrdoměrem. Data a obrazová dokumentace byla porovnána s referenčními charakteristikami, získanými ze srovnávacího vzorku. Výsledky byly dostatečně průkazné pro konstatování, že posuzované náhradní chladící kroužky byly vyrobeny z deklarované tavby materiálu a zjištěné materiálové charakteristiky odpovídají předloženému inspekčnímu certifikátu.

### **Závěr**

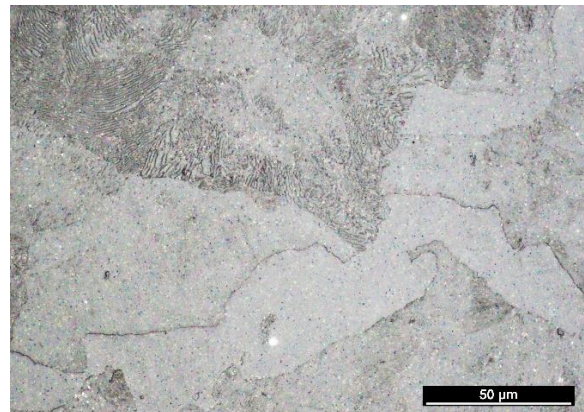
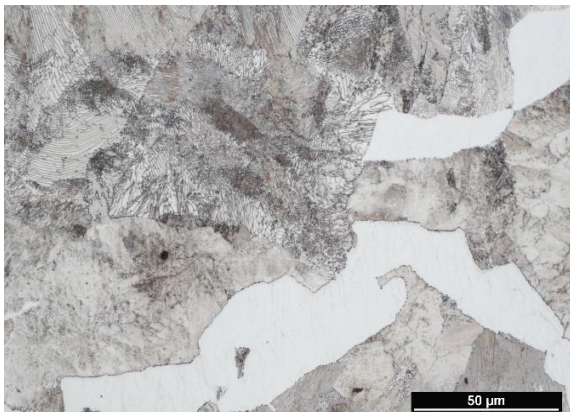
Metoda metalografických replik je tradičně využívána pro ověření nebo zjištění mikrostrukturních charakteristik kovových materiálů komponent, u kterých je zásah do jejich integrity destruktivním odběrem vzorku nežádoucí. V rámci řešení projektu hodnocení provozního poškození chladících kroužků motoru dieselgenerátoru JE Dukovany byly odzkoušeny a aplikovány nedestruktivní metodiky, zahrnující odběr metalografických replik pro pozitivní materiálovou identifikaci náhradních dílů. Nedestruktivní materiálová kontrola záložních chladících kroužků, vyrobených z litiny, byla vzhledem k obdobnému chemickému složení posuzovaných litin založena výhradně na mikrostrukturních markantech silikonových replik. V případě nových chladících kroužků vyrobených z oceli C45 byl odběr metalografických replik součástí metodiky PMI společně s analýzou chemického složení XRF a měřením tvrdosti přenosným tvrdoměrem. Pozitivní materiálová identifikace s využitím metalografických replik v případě litinových i ocelových chladících kroužků umožnila jednoznačné určení materiálové shody.

## Literatura

- [1] Krpec, M., Ernestová, M., Brabec, P., Tonarová, D. (2018): *Hodnocení mikrostruktury, mechanických vlastností a chemického složení chladících vložek z DG 6ZL40/48 EDU*, zpráva ÚJV DITI 2302/547.
- [2] Ernestová, M., Krpec, M., Brabec, P., Tonarová, D., Čančura, Z. (2018): *Hodnocení poškození chladících kroužků diesegenerátoru 6ZL40/48 NA JE DUKOVANY*. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách – příspěvek na 13. konferenci. Srní.
- [3] ASTM E 1351 – 01: *Standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas*.
- [4] Brabec, P. (2017): *Silikonové repliky – nepřímá metoda hodnocení poškození komponent*. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách – sborník z 12. konference. Srní: VZÚ Plzeň, ZČU Plzeň.



Obr. 1: Dokumentace mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem z metalografického výbrusu (vlevo) a silikonové repliky metalografického výbrusu (vpravo) – nelept



Obr. 2: Dokumentace mikrostruktury oceli C45 z metalografického výbrusu (vlevo) a silikonové repliky metalografického výbrusu (vpravo)

# REJSTŘÍK AUTORŮ

**A**  
Adamech Marek ..... 61, 103

**B**  
Baálák Miloš ..... 61, 103  
Bátěk David ..... 1  
Benčík Marek ..... 1  
Bonaventurová Kateřina ..... 19  
Brabec Petr ..... 27, 57, 167  
Brom Jaroslav ..... 15  
Březina Martin ..... 61  
Burda Jaroslav ..... 57  
Buršík Ondřej ..... 71

**Č**  
Čančura Zdeněk ..... 27, 95, 99  
Čech Jan ..... 151  
Černý Josef ..... 137  
Černý Miroslav J. .... 159  
Čmakal Josef ..... 65

**D**  
Ducháček Petr ..... 95, 99  
Džugan Ján ..... 79

**E**  
Ernestová Miroslava ..... 27  
Ertl Jakub ..... 87

**F**  
Faltýnková Alena ..... 53  
Fleischhans Jiří ..... 91

**H**  
Habrcetl Vlastimil ..... 129  
Hakl Jan ..... 151  
Havelková Libuše ..... 151  
Horváth Jakub ..... 111, 143  
Horváth Ladislav ..... 143  
Houdek Václav ..... 31  
Houdková Šárka ..... 137  
Hyrát Jan ..... 31

**Ch**  
Chmela Tomáš ..... 65  
Chuchvalec Petr ..... 155  
Chvostová Eva ..... 79

**J**  
Jakl Jan ..... 35  
Janovec Jiří ..... 111, 147  
Jiříček Ivo ..... 51  
Junek Michal ..... 111, 147

**K**  
Kamenický Jan ..... 47  
Kander Ladislav ..... 75  
Kasárník Milan ..... 43  
Kasl Josef ..... 125  
Kaška Miloš ..... 43  
Kec Jan ..... 155  
Kindelmann Petr ..... 75  
Kobzová Alena ..... 121, 133  
Konop Radek ..... 11  
Konopík Pavel ..... 79  
Kopřiva Radim ..... 71  
Kos Petr ..... 91  
Koula Václav ..... 65  
Krhounek Vladislav ..... 1  
Kronďák Martin ..... 69, 133  
Krpec Miroslav ..... 27  
Künkel Sven ..... 35

**L**  
Lazar Jan ..... 75  
Liška Jindřich ..... 35  
Lukáš Jiří ..... 115

**M**  
Mareček Oto ..... 43  
Mareš Pavel ..... 15, 83, 129  
Marešová Barbora ..... 71  
Marková Jana ..... 163  
Matějová Miroslava ..... 125  
Materna Aleš ..... 71  
Mlčoch Jan ..... 163  
Mlnařík Jakub ..... 155  
Molnár Jan ..... 163  
Mrštík Jakub ..... 125

**N**  
Neumannová Šárka ..... 151  
Novák Matyáš ..... 125

**P**  
Palán Marek ..... 95, 99  
Patera Jan ..... 129  
Pazderová Martina ..... 53  
Petelová Petra ..... 71  
Petzová Jana ..... 61, 103

Polach Pavel .....	137
Polcar Petr .....	75
Preší Kamil .....	163

## R

Rohlová Marie .....	111, 143
---------------------	----------

## S

Ságl Pavel .....	47
Skála Zdeněk .....	23
Slováček Marek .....	5
Slunéčko Tomáš .....	65
Smejkal Martin .....	143
Smolík Luboš .....	31
Stainer Lukáš .....	23
Svobodová Marie .....	65, 147
Sýkora Miroslav .....	163
Synáč Jaroslav .....	39
Szelag Petr .....	53

## Š

Šmolík Petr .....	11
Švehla Jan .....	91

## T

Tonarová Dana .....	27, 57, 167
---------------------	-------------

## U

Urban Pavel .....	19
-------------------	----

## V

Václavík Jaroslav .....	125
Vajdák Michal .....	19
Veselá Jana .....	83
Veselý Stanislav .....	107
Vít Jan .....	23
Vlasák Tomáš .....	151

## W

Wandrol Jan .....	1
-------------------	---

## Z

Zahrádka Pavel .....	129
Zajíček Jaroslav .....	47

## Ž

Žďárek Jiří .....	1
-------------------	---

Kolektiv autorů

Sborník z 13. konference

**„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“**

Srní, 16. – 18. říjen 2018

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Vydavatelství**

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach a Lukáš Stuna

Počet stran: 221

Vydání první

Náklad: 200 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Petr Zuna, Václav Liška, Pavel Polach a Radovan Šťastný

ISBN 978-80-261-0794-1

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2018