

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

**ŽIVOTNOST KOMPONENT  
ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ**

Srní  
17. – 19. října 2023

Kolektiv autorů

Sborník z 18. konference  
**„Životnost komponent energetických zařízení“**  
Srní, 17. – 19. října 2023

Foto na přebalu: Michal Švantner

ISBN 978-80-261-1175-7

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2023

## ZÁŠTITA MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU



MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU

Ing. Jozef Síkela  
ministr

uděluje

# Z Á Š T I T U

MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU

18. ročníku vědecké konference „Životnost komponent energetických zařízení“,  
která se uskuteční ve dnech 17. – 19. října 2023

V Praze dne 31. května 2023



MINISTERSTVO  
PRŮMYSLU A OBCHODU

## **ODBORNÍ GARANTI**

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

## **PROGRAMOVÝ VÝBOR**

doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D. – VZÚ Plzeň  
Ing. Zdeněk Čančura, Ph.D. – ČEZ, a. s.  
Prof. Ing. František Hrdlička, CSc., FEng. – ČVUT v Praze, FS  
Ing. Martin Kronďák, Ph.D. – ÚJV Řež, a. s.  
Mgr. Aleš Laciok, MBA, FEng. – ČEZ, a. s.  
doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng. – VZÚ Plzeň  
Ing. Kamil Prešl – ČEZ, a. s.  
Ing. Radovan Šťastný – nezávislý expert  
Ing. Tomáš Zajíc, MBA – ČEZ, a. s.  
Ing. Jan Zdebor, CSc., FEng. – ZČU v Plzni, FS  
Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR

## **ORGANIZAČNÍ VÝBOR**

Lenka Lopatková – VZÚ Plzeň  
doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng. – VZÚ Plzeň  
doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D. – VZÚ Plzeň



## GENERÁLNÍ PARTNEŘI



ÚJV Řež, a. s.



SKUPINA ČEZ

## HLAVNÍ PARTNEŘI



CVŘ

Centrum  
výzkumu Řež



ŠKODA JS



**OLYMPUS®**

---



**MEDIÁLNÍ PARTNEŘI**

all•for **power**

**je**

## ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDAJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK

### ÚTERÝ 17. 10. 2023 (ODPOLEDNE)

#### 1. BLOK PŘEDNÁŠEK

*Využití vodíkových technologií & Problematika diagnostiky klasických elektráren*  
Garant: doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng.

#### 2. BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika sekundárního okruhu jaderných elektráren & Materiálová technologie*  
Garant: doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D.

### STŘEDA 18. 10. 2023 (DOPOLEDNE)

#### 1. BLOK PŘEDNÁŠEK

*Řešení projektů VaV & Korozní inženýrství*  
Garant: Ing. Kamil Prešl

#### 2. BLOK PŘEDNÁŠEK

*OZE & Konstrukční prvky primárního okruhu jaderných elektráren*  
Garant: Ing. Tomáš Zajíc, MBA

### ČTVRTEK 19. 10. 2023 (DOPOLEDNE)

#### 1. BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika primárního okruhu jaderných elektráren*  
Garant: Ing. Martin Kronďák, Ph.D.

#### 2. BLOK PŘEDNÁŠEK

*Problematika primárního okruhu jaderných elektráren*  
Garant: doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng.

## PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ

Dámy a pánové,

srdečně Vás vítám na osmnáctém ročníku energetické konference v Srní. Díky stále rostoucímu zájmu a praktickému formátu se naše konference postupně stala největší akcí svého druhu v České republice. Dovolte mi proto na úvod poděkovat pravidelným i novým autorům odborných příspěvků i velkému množství účastníků konference za neutuchající zájem a Vaši energii a čas, který konferenci v Srní věnujete. Velmi si toho vážím.

Energetika se postupně stává nejdiskutovanějším tématem ve společnosti. Dnes stojíme před mnoha výzvami, jako je potřeba přechodu k udržitelným zdrojům energie, snižování emisí skleníkových plynů, zajištění energetické nezávislosti a zvýšení energetické efektivity. Tyto úkoly vyžadují širokou spolupráci, inovace a nezbytné strategické plánování.

Návrhem programu a struktury tematických bloků konference se snažíme představit realistická řešení a umožnit sdílení pohledů a zkušeností odborníků, kteří se pohybují na špičce energetického průmyslu, ale také dát příležitost prezentaci názorů a nápadů mladší generace, která bude v budoucnu tuto oblast formovat. Cílem našeho společného setkávání tak není pouze technický popis dílčích řešení a provozních inovací, ale hlavně předávání unikátních znalostí a zkušeností zaměřených na to, jak efektivně využívat stávající energetické zdroje a rozumné, efektivní využívání technologií nových.

V letošním ročníku byl zájem o účast na konferenci (více než 180 účastníků) i o prezentaci hodnotných odborných výsledků rekordní, celkem 45 příspěvků. Z časových důvodů jsme byli nuceni zavést posterovou sekci. Ústně bude prezentováno 37 příspěvků (z toho 2 plenární), formou posteru 10.

Úvodní den konference je zaměřen na využití vodíkových technologií a na problematiku diagnostiky klasických elektráren a sekundárního okruhu jaderných elektráren. Středeční program bude zahájen prezentací posterů, následovat budou přednášky zaměřené na řešení projektů VaV. Další přednášky budou věnované koroznímu inženýrství a problematice konstrukčních prvků primárního okruhu jaderných elektráren. Celý čtvrtek bude věnován rozličným tématům zaměřených na primární okruh jaderných elektráren.

Závěrem mi dovoluť jménem programového výboru a organizačního týmu VZÚ Plzeň poděkovat všem partnerům, kteří také v letošním roce výrazně přispěli ke konání osmnáctého ročníku konference a Vám, drahým hostům, popřát, aby i letošní konference v Srní byla pro Vás odborně i společensky přínosná a obohacující.

Těším se na viděnou.

Stanislav Martínek

## PROGRAM KONFERENCE

<b>Úterý, 17. října 2023</b>	
Registrace účastníků v hotelu Srní u recepcce, 10:00 – 18:00	
Oběd v hotelu Srní, 11:30 – 12:45	
<b>Zahájení konference, 13:00</b>	
Zahájení konference: Stanislav Martínek (VZÚ Plzeň) Novinky z VaV: Šárka Houdková (VZÚ Plzeň a Výzkumná rada TA ČR) Organizační pokyny: Pavel Polach (VZÚ Plzeň)	
<b>1. odpolední blok přednášek – Pavel Polach, 13:30 – 15:30</b>	
13:30 – 14:00	Plenární přednáška – L. Janura, Vodíková strategie České republiky
14:00 – 14:15	S. Veselý, Analýza vlivu mísení zemního plynu a vodíku na funkci spalovacích turbín a dmychadel
14:15 – 14:30	K. Kuchřáková a kol., Nebezpečí křehkého poškození ocelí v prostředí směsi zemního plynu a vodíku
14:30 – 14:45	P. Polach a kol., Mobilní plnicí vodíková stanice a výpočetní podpora pro stanovení optimálních parametrů plnění
14:45 – 15:00	Z. Kubín a kol., Komplexní služba pro turbínu a generátor
15:00 – 15:15	F. Schmidt, Vizualní inspekce vnitřních částí energetických bloků leteckým inspekčním zařízením
15:15 – 15:30	P. Mareš a kol., Manipulátory jako prostředek pro zvýšení kvality provozních kontrol
Coffee break, 15:30 – 16:15	
<b>2. odpolední blok přednášek – Šárka Houdková (VZÚ Plzeň), 16:15 – 17:45</b>	
16:15 – 16:30	J. Kasárník a kol., Monitorování částečných výbojů ve statorovém vinutí synchronních generátorů
16:30 – 16:45	J. Ertl a kol., Stárnutí parogenerátorů a mechanické čištění jejich sekundární strany
16:45 – 17:00	J. Veselá, Ultrazvuková kontrola ochrany povrchu komponent pro energetiku
17:00 – 17:15	J. Strejcius a kol., Vliv laserového kuličkování na únavovou pevnost lité martenzitické nerezové oceli v prostředí říční vody
17:15 – 17:30	L. Mrňa a kol., Svařování materiálů pro výrobu energetických zařízení laserem a hybridní technologií laser-MIG, hybridní navařování
17:30 – 17:45	S. Štarman, Metody Phased Array v energetice
Slavnostní večeře v hotelu Srní, 19:00	

<b>Středa, 18. října 2023</b>	
Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15	
8:25 – 8:55	Posterová sekce
T. Bártíková a kol., Odolnost a korozní chování slitiny 800H se svarem ve vysokoteplotním heliu	
J. Brom a kol., Vývoj technologií pro monitorování provozního stavu naváděcích zařízení (per a drážek) vnitřních částí tlakových nádob reaktoru VVER 440	
J. Dvořák a kol., Stanovení vlivu geometrie vzorku na rozvoj creepové deformace pomocí metody akustické emise	
E. Chvostová a P. Konopík, Výzkum creepových vlastností materiálu pomocí malých vzorků	
H. Jirková a kol., Identifikace vlivu vodíku v závislosti na konstrukčním stavu potrubní distribuční infrastruktury a vodíkových nádrží	
M. Pazderová a kol., Korozní odolnost ODS-Eurofer v prostředí HLM	
I. Schnablová a kol., Požadavky na realizaci zkoušek nízkocyklové únavy v korozním prostředí	
V. Šafařík a kol., Kontrola svarových spojů kotlových trubek pomocí vizuální a kapilární metody NDT	
M. Šípová a D. Marušáková, Hodnocení korozního chování austenitické oceli 08Cr18Ni10Ti za vysokých parametrů vody	
J. Václavík a R. Musilová, Měření torzních vibrací telemetrickými systémy	
<b>1. dopolední blok přednášek – Kamil Prešl (ČEZ, a. s.), 9:00 – 10:15</b>	
9:00 – 9:15	J. Žďárek a P. Kadečka, EU projekt OFFERR „Evropská platforma pro přístup k zařízením jaderného výzkumu a vývoje“
9:15 – 9:30	V. Pištora, APAL – evropský projekt zaměřený na vývoj pokročilých metod hodnocení tlakově-teplotních šoků
9:30 – 9:45	R. Kopřiva a kol., Využití miniaturizovaných zkušebních těles v rámci řešení evropských projektů Horizon 2020
9:45 – 10:00	F. Sedlák a M. Joanidisová, Korozní zkoušky austenitických svarů s uhlíkovým kořenem v oblasti meze kluzu základního materiálu
10:00 – 10:15	D. Varner a M. Varner, Vliv velikosti na korozní únavovou pevnost lité oceli 13%Cr-4%Ni
Coffee break, 10:30 – 11:15	
<b>2. dopolední blok přednášek – Tomáš Zajíc (ČEZ, a. s.), 11:15 – 13:00</b>	
11:15 – 11:45	Plenární přednáška – P. Řežábek, Udržitelná energetika a využití OZE
11:45 – 12:00	J. Blažek a kol., Inovace procesu návrhu zpětných odběrových klapek s využitím digitalizace
12:00 – 12:15	M. Pulc, Potrubní hermetické průchodky
12:15 – 12:30	M. Ruchař, Produkty ŠKODA JS a.s. pro elektrárny typu VVER a hodnocení provozních zkušeností
12:30 – 12:45	I. Kostolný a M. Jáňa, Vývoj modifikácie nátrubku HRK na vieku reaktora 4. bloku v SE EBO
12:45 – 13:00	M. Slováček a kol., Opravy provedené VUZ Bratislava na JE typu VVER
Oběd v hotelu Srní, 13:15 – 14:15	
Večeře, společenský večer v sále hotelu Srní – od 18:30	
Bowlingový turnaj o „Pohár krále hotelů Šumava a Srní“ – od 18:30	

**Čtvrtek, 19. října 2023**

Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15

**1. dopolední blok přednášek – Martin Kronďák (ÚJV Řež, a.s.), 8:30 – 10:00**

8:30 – 8:45	M. Bařák a J. Petzová, Netesnosti na rúrce z IL pre meranie systému kontroly tesnosti ochranných plášťov primárných kolektorov PG JE Bohunice
8:45 – 9:00	J. Ďurica a J. Petzová, Hodnotenie materiálových vlastností kompenzátora objemu JE Bohunice V1
9:00 – 9:15	D. Slnek a M. Hajas, Hodnotenie vzoriek exponovaných v koróznej komore jadrovej elektrárni Bohunice
9:15 – 9:30	J. Cizner a J. Hruška, Vysokoteplotní koroze vybraných niklových slitin v prostředí technického dusíku a helia pro použití v jaderné energetice
9:30 – 9:45	V. Sklenička a kol., Creepové zkoušky zirkoniových povlakovaných tyčí jaderného paliva a jejich interpretace
9:45 – 10:00	K. Trojan a kol., Difrakční analýza zirkoniových slitin palivového pokrytí jaderného paliva

Coffee break, 10:00 – 10:30

**2. dopolední blok přednášek – Pavel Polach (VZÚ Plzeň), 10:30 – 12:00**

10:30 – 10:45	Z. Vávřovcová a kol., Laboratorní hodnocení provozní degradace potrubí se svary TVD EDU 2
10:45 – 11:00	M. Ohanková a kol., Laboratorní expoziční smyčka s vnitřním přetlakem a korozním zásypem
11:00 – 11:15	J. Kahoun Hejhalová a kol., Vývoj a využití nízkoteplotního ozařování konstrukčních materiálů jaderných reaktorů
11:15 – 11:30	L. Húska, Měření deformace PAZ ETE VVER 1000 za účelem zjištění nulového stavu PAZ vzhledem k rozvoji swellingu
11:30 – 11:45	K. Andrlé, Technologie pro zkoušky zařízení na podmínky LOCA havárie
11:45 – 12:00	P. Gál a kol., Termomechanické hodnocení tlakové nádoby reaktoru během těžké havárie – určení materiálových vstupních dat a jejich použití v simulacích

**Oficiální ukončení konference, 12:00 – 12:15**

Oběd v hotelu Srní, 12:30 – 13:30

## OBSAH

<b>ZÁŠTITA MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU .....</b>	<b>III</b>
<b>ODBORNÍ GARANTI .....</b>	<b>IV</b>
<b>PROGRAMOVÝ VÝBOR .....</b>	<b>IV</b>
<b>ORGANIZAČNÍ VÝBOR .....</b>	<b>IV</b>
<b>GENERÁLNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>V</b>
<b>HLAVNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>V</b>
<b>MEDIÁLNÍ PARTNEŘI .....</b>	<b>VI</b>
<b>ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDÁJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK .....</b>	<b>VII</b>
<b>PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ .....</b>	<b>VIII</b>
<b>PROGRAM KONFERENCE .....</b>	<b>IX</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>XII</b>
<b>ANALÝZA VLIVU MÍSENÍ ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU NA FUNKCI SPALOVACÍCH TURBÍN A DMYCHADEL .....</b>	<b>1</b>
<b>ANALYSIS OF THE EFFECT OF MIXING NATURAL GAS AND HYDROGEN ON THE FUNCTION OF COMBUSTION TURBINES AND BLOWERS</b>	
STANISLAV VESELÝ	
<b>NEBEZPEČÍ KŘEHKÉHO POŠKOZENÍ OCELÍ V PROSTŘEDÍ SMĚSI ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU .....</b>	<b>5</b>
<b>RISK OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT IN A MIXTURE OF NATURAL GAS AND HYDROGEN</b>	
KLÁRA KUCHŤÁKOVÁ, DARJA RUDOMILOVA, VÁCLAV ŠEFL A TOMÁŠ PROŠEK	
<b>MOBILNÍ PLNICÍ VODÍKOVÁ STANICE A VÝPOČETNÍ PODPORA PRO STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ PLNĚNÍ .....</b>	<b>11</b>
<b>MOBILE HYDROGEN FILLING STATION AND CALCULATION SUPPORT FOR DETERMINING OPTIMAL FILLING PARAMETERS</b>	
PAVEL POLACH, JOSEF LEXA, MAREK BĚLOHOUBEK A JAN LAZAR	
<b>KOMPLEXNÍ SLUŽBA PRO TURBÍNU A GENERÁTOR .....</b>	<b>17</b>
<b>COMPREHENSIVE SERVICE FOR TURBINE AND GENERATOR</b>	
ZDENĚK KUBÍN, DAVID AIŠMAN, VÍT HORÁČEK A JAN ŠIPLA	
<b>VIZUÁLNÍ INSPEKCE VNITŘNÍCH ČÁSTÍ ENERGETICKÝCH BLOKŮ LETECKÝM INSPEKČNÍM ZAŘÍZENÍM .....</b>	<b>21</b>
<b>VISUAL INSPECTION OF INTERNAL PARTS OF ENERGY BLOCKS BY AERIAL INSPECTION EQUIPMENT</b>	
FILIP SCHMIDT	
<b>MANIPULÁTORY JAKO PROSTŘEDEK PRO ZVÝŠENÍ KVALITY PROVOZNÍCH KONTROL .....</b>	<b>23</b>
<b>MANIPULATORS AS A MEANS OF INCREASING THE QUALITY OF IN-SERVICE INSPECTIONS</b>	
PAVEL MAREŠ, TOMÁŠ TROJAN A JIŘÍ NETUŠIL	
<b>MONITOROVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ VE STATOROVÉM VINUTÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ .....</b>	<b>27</b>
<b>PARTIAL DISCHARGE MONITORING OF SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR WINDING</b>	
MILAN KASÁRNÍK, OTO MAREČEK A MILOŠ KAŠKA	
<b>STÁRNUTÍ PAROGENERÁTORŮ A MECHANICKÉ ČIŠTĚNÍ JEJICH SEKUNDÁRNÍ STRANY .....</b>	<b>35</b>
<b>AGEING MANAGEMENT OF STEAM GENERATORS AND THEIR MECHANICAL CLEANING</b>	
JAKUB ĚRTL, DANIEL DUKOVSKÝ A LUKÁŠ JOCH	



<b>ULTRAZVUKOVÁ KONTROLA OCHRANY POVRCHU KOMPONENT PRO ENERGETIKU .....</b>	<b>39</b>
<b>ULTRASONIC INSPECTION OF SURFACE PROTECTION OF POWER COMPONENTS</b>	
JANA VESELÁ	
<b>VLIV LASEROVÉHO KULIČKOVÁNÍ NA ÚNAVOVOU PEVNOST LITÉ MARTENZITICKÉ NEREZOVÉ OCELI V PROSTŘEDÍ ŘÍČNÍ VODY .....</b>	<b>45</b>
<b>EFFECT OF LASER PEENING TREATMENT ON HIGH CYCLE FATIGUE STRENGTH OF CAST MARTENSITIC STAINLESS STEEL IN RIVER WATER ENVIRONMENT</b>	
JOSEF STREJCIUS, ZDENĚK FULÍN, ZBYNĚK ŠPIRIT A DAVID BRICÍN	
<b>SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ PRO VÝROBU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ LASEREM A HYBRIDNÍ TECHNOLOGIÍ LASER-MIG, HYBRIDNÍ NAVAŘOVÁNÍ.....</b>	<b>51</b>
<b>WELDING OF MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF ENERGY DEVICES WITH LASER AND LASER-MIG HYBRID TECHNOLOGY, HYBRID WELDING</b>	
LIBOR MRŇA, HANA ŠEBESTOVÁ, JAN NOVOTNÝ A DAVID BERAN	
<b>METODY PHASED ARRAY ULTRAZVUKU V ENERGETICE.....</b>	<b>57</b>
<b>PHASED ARRAY ULTRASONIC METHODS IN THE POWER INDUSTRY</b>	
STANISLAV ŠTARMAN	
<b>EU PROJEKT OFFERR „EVROPSKÁ PLATFORMA PRO PŘÍSTUP K ZAŘÍZENÍM JADERNÉHO VÝZKUMU A VÝVOJE .....</b>	<b>69</b>
<b>EU PROJEKT OFFERR “EUROPEAN PLATFORM FOR ACCESSING NUCLEAR RESEARCH AND DEVELOPMENT FACILITIES”</b>	
JIŘÍ ŽDÁREK A PETR KADEČKA	
<b>APAL – EVROPSKÝ PROJEKT ZAMĚŘENÝ NA VÝVOJ POKROČILÝCH METOD HODNOCENÍ TLAKOVĚ-TEPLOTNÍCH ŠOKŮ.....</b>	<b>73</b>
<b>APAL – EUROPEAN PROJECT FOCUSED ON DEVELOPMENT OF ADVANCED METHODS OF PRESSURIZED-THERMAL SHOCK ASSESSMENT</b>	
VLADISLAV PIŠTORA	
<b>VYUŽITÍ MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES V RÁMCI ŘEŠENÍ EVROPSKÝCH PROJEKTŮ HORIZON 2020 .....</b>	<b>77</b>
<b>UTILIZATION OF THE MINIATURIZED TEST SPECIMENS WITHIN THE EUROPEAN PROJECTS HORIZON 2020</b>	
RADIM KOPŘIVA, JITKA KAHOUN HEJHALOVÁ, VERONIKA KOZÁKOVÁ, PETRA KLATOVSKÁ A IVANA SCHNABLOVÁ	
<b>KOROZNÍ ZKOUŠKY AUSTENITICKÝCH SVARŮ S UHLÍKOVÝM KOŘENEM V OBLASTI MEZE KLUZU ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU .....</b>	<b>81</b>
<b>CORROSION TESTS OF AUSTENITE WELDS WITH CARBON ROOT IN THE AREA OF THE YIELD STRENGTH OF THE BASE MATERIAL</b>	
FILIP SEDLÁK A MICHAELA JOANIDISOVÁ	
<b>VLIV VELIKOSTI NA KOROZNÍ ÚNAVOVOU PEVNOST LITÉ OCELI 13%CR-4%NI.....</b>	<b>87</b>
<b>SIZE EFFECTS ON THE CORROSION FATIGUE STRENGTH OF 13%CR-4%NI CAST STEEL</b>	
DAVID VARNER AND MIROSLAV VARNER	
<b>INOVACE PROCESU NÁVRHU ZPĚTNÝCH ODBĚROVÝCH KLAPEK S VYUŽITÍM DIGITALIZACE.....</b>	<b>95</b>
<b>INNOVATION OF THE BLEED CHECK VALVE DESIGN PROCESS BASED ON DIGITAL TWIN APPLICATION</b>	
JAN BLAŽEK, JAN SLADKÝ A STANISLAV PLÁNIČKA	
<b>POTRUBNÍ HERMETICKÉ PRŮCHODKY .....</b>	<b>103</b>

**HERMETIC PIPE PENETRATIONS**

MARTIN PULC

**PRODUKTY ŠKODA JS A.S. PRO ELEKTRÁRNY TYPU VVER A HODNOCENÍ PROVOZNÍCH ZKUŠENOSTÍ..... 109**
**ŠKODA JS A.S. PRODUCTS FOR VVER POWER PLANTS AND EVALUATION OF OPERATING EXPERIENCE**

MILOSLAV RUCHAŘ

**VÝVOJ MODIFIKÁCIE NÁTRUBKU HRK NA VEKU REAKTORA 4. BLOKU V SE EBO ..... 115**
**DEVELOPMENT OF THE MODIFIED HRK NOZZLE ON THE REACTOR LID OF BLOCK 4 IN SE EBO**

IGOR KOSTOLNÝ A MIROSLAV JÁŇA

**OPRAVY PROVEDENÉ VUZ BRATISLAVA NA JE TYPU VVER ..... 121**
**THE REPAIR DONE BY WRI BRATISLAVA ON NPP TYPE VVER**

MAREK SLOVÁČEK, IGOR KOSTOLNÝ A MIROSLAV JÁŇA

**NETESNOSTI NA RÚRKE Z IL PRE MERANIE SYSTÉMU KONTROLY TESNOSTI OCHRANNÝCH PLÁŠŤOV  
PRIMÁRNYCH KOLEKTOROV PG JE BOHUNICE..... 125**
**LEAKAGES ON THE IMPULSE LINE TUBE FOR MEASUREMENT OF THE PROTECTIVE COVER TIGHTNESS  
CONTROL SYSTEM OF THE STEAMGENERATOR PRIMARY COLLECTOR NPP BOHUNICE**

MILOŠ BALÁK A JANA PETZOVÁ

**HODNOTENIE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ KOMPENZÁTORA OBJEMU JE BOHUNICE V1 ..... 133**
**EVALUATION OF THE MATERIAL PROPERTIES OF THE VOLUME COMPENSATOR JE BOHUNICE V1**

JURAJ ĎURICA A JANA PETZOVÁ

**HODNOTENIE VZORIEK EXPOZOVANÝCH V KORÓZNEJ KOMORE JADROVEJ ELEKTRÁRNI BOHUNICE ..... 139**
**EVALUATION OF THE SAMPLES EXPOSED IN THE CORROSION CHAMBER OF THE BOHUNICA NUCLEAR POWER  
PLANT**

DÁVID SLNEK A MICHAL HAJAS

**VYSOKOTEPLNÍ KOROZE VYBRANÝCH NIKLOVÝCH SLITIN V PROSTŘEDÍ TECHNICKÉHO DUSÍKU A HELIA PRO  
POUŽITÍ V JADERNÉ ENERGETICE..... 145**
**HIGH-TEMPERATURE CORROSION OF SELECTED NICKEL ALLOYS IN THE ENVIRONMENT OF TECHNICAL  
NITROGEN AND HELIUM FOR USE IN NUCLEAR ENERGY**

JOSEF CÍZNER A JAN HRUŠKA

**CREEPOVÉ ZKOUŠKY ZIRKONIOVÝCH POVLAKOVÝCH TYČÍ JADERNÉHO PALIVA A JEJICH INTERPRETACE..... 151**
**CREEP TESTS OF ZIRCONIUM FUEL CLADDING TUBES AND THEIR INTERPRETATION**

 VÁCLAV SKLENIČKA, KVĚTA KUCHAROVÁ, LUBOŠ KLOC, JIŘÍ DVOŘÁK, PETR KRÁL, MARIE KVAPILOVÁ, VĚRA VRTÍLKOVÁ A JAKUB  
KREJČÍ

**DIFRAKČNÍ ANALÝZA ZIRKONIOVÝCH SLITIN PALIVOVÉHO POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA..... 157**
**DIFFRACTION ANALYSIS OF ZIRCONIUM ALLOYS FOR NUCLEAR FUEL CLADDING**

KAREL TROJAN, VĚRA VRTÍLKOVÁ, JIŘÍ ČAPEK, JAKUB KREJČÍ A NIKOLAJ GANEV

**LABORATORNÍ HODNOCENÍ PROVOZNÍ DEGRADACE POTRUBÍ SE SVARY TVD EDU 2 ..... 161**
**EVALUATION OF THE OPERATIONAL DEGRADATION OF TVD EDU 2 PIPELINE WELDS**

ZUZANA VÁVROVCOVÁ, MIROSLAV KRPEC, ZBYNĚK VESELKA, PETR BRABEC A PETR VLČEK

**LABORATORNÍ EXPOZIČNÍ SMYČKA S VNITŘNÍM PŘETLAKEM A KOROZNÍM ZÁSYPEM..... 169**
**LABORATORY EXPOSURE LOOP WITH INTERNAL OVER-PRESSURE, COVERED WITH CORROSION ASH**

MARIE OHANKOVÁ, LUCIE PILSOVÁ, IRENA ANDRŠOVÁ, TOMÁŠ CHMELA A JOSEF ČMAKAL

**VÝVOJ A VYUŽITÍ NÍZKOTEPLNÍHO OZAŘOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ JADERNÝCH REAKTORŮ . 175**  
**DEVELOPMENT AND USE OF LOW-TEMPERATURE IRRADIATION OF NUCLEAR REACTOR STRUCTURAL MATERIALS**

JITKA KAHOUN HEJHALOVÁ, MILOŠ KYTKA, RADIM KOPŘIVA, MILAN PĚNKAVA A WITOLDA SOUKUPOVÁ

**MĚŘENÍ DEFORMACE PAZ ETE VVER 1000 ZA ÚČELEM ZJIŠTĚNÍ NULOVÉHO STAVU PAZ VZHLEDEM K ROZVOJI SWELLINGU ..... 181**
**MEASUREMENT DEFORMATION OF THE PAZ ETE VVER 1000 FOR DETERMINING THE ZERO STATE OF THE PAZ DUE TO THE DEVELOPMENT OF SWELLING**

LUKÁŠ HÚSKA

**TECHNOLOGIE PRO ZKOUŠKY ZAŘÍZENÍ NA PODMÍNKY LOCA HAVÁRIE ..... 185**
**TECHNOLOGY FOR EQUIPMENT TESTING FOR LOCA ACCIDENT CONDITIONS**

KAREL ANDRLE

**TERMOMECHANICKÉ HODNOCENÍ TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU BĚHEM TĚŽKÉ HAVÁRIE – URČENÍ MATERIÁLOVÝCH VSTUPNÍCH DAT A JEJICH POUŽITÍ V SIMULACÍCH ..... 189**
**THERMOMECHANICAL EVALUATION OF THE REACTOR PRESSURE VESSEL DURING A SEVERE ACCIDENT – DETERMINATION OF MATERIAL INPUT DATA AND THEIR APPLICATION SIMULATIONS**

PETR GÁL, MIROSLAV KOTOUČ, PETR DYMÁČEK, DUŠAN GABRIEL A VLADISLAV PIŠTORA

**ODOLNOST A KOROZNÍ CHOVÁNÍ SLITINY 800H SE SVAREM VE VYSOKOTEPLNÍM HELIU ..... 193**
**RESISTANCE AND CORROSION BEHAVIOR OF ALLOY 800H WITH WELD IN HIGH TEMPERATURE HELIUM**

TEREZA BARTÍKOVÁ, JAN PROCHÁZKA A JAN BERKA

**VAV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV A NEDESTRUKTIVNÍCH METOD V ROCE 2022 ..... 199**
**R&D PROJECTS IN CVR FOR SURFACE TREATMENTS AND NON – DESTRUCTIVE METHODS IN 2022**

JAROSLAV BROM, JANA VESELÁ, MICHAL CHOCHOLOUŠEK A JAN PATERA

**STANOVENÍ VLIVU GEOMETRIE VZORKU NA ROZVOJ CREEPOVÉ DEFORMACE POMOCÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE ..... 205**
**EVALUATION OF SAMPLE GEOMETRY EFFECT ON CREEP DEFORMATION PROGRESS USING ACOUSTIC EMISSION METHOD**

JIŘÍ DVOŘÁK, VÁCLAV SKLENIČKA PETR KRÁL, MARIE KVAPILOVÁ, MARIE SVOBODOVÁ, JAN ŠIFNER A VÁCLAV KOULA

**VÝZKUM CREEPOVÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU POMOCÍ MALÝCH VZORKŮ ..... 211**
**INVESTIGATION OF CREEP PROPERTIES USING SUB-SPECIMENS**

EVA CHVOSTOVÁ A PAVEL KONOPÍK

**IDENTIFIKACE VLIVU VODÍKU V ZÁVISLOSTI NA KONSTRUKČNÍM STAVU POTRUBNÍ DISTRIBUČNÍ INFRASTRUKTURY A SKLADOVACÍCH NÁDRŽÍ..... 215**
**IDENTIFICATION OF THE EFFECT OF HYDROGEN AS A FUNCTION OF STRUCTURAL CONDITION IN PIPELINE DISTRIBUTION INFRASTRUCTURE AND STORAGE TANKS**

HANA JIRKOVÁ, DAVID AIŠMAN, MARIE FRANK NETRVALOVÁ A ŠÁRKA HOUDKOVÁ

**KOROZNÍ ODOLNOST ODS-EUROFER V PROSTŘEDÍ HLM ..... 219**
**CORROSION RESISTANCE OF ODS-EUROFER IN HLM ENVIRONMENT**

MARTINA PAZDEROVÁ, ANNA HOJNÁ, JAN VÍT, HYNEK HADRABA A JAN ČÍŽEK

**POŽADAVKY NA REALIZACI ZKOUŠEK NÍZKOCYKLOVÉ ÚNAVY V KOROZNÍM PROSTŘEDÍ ..... 223**

**REQUIREMENTS FOR PERFORMING LOW-CYCLE FATIGUE TESTS IN A CORROSIVE ENVIROMENT**

IVANA SCHNABLOVÁ, VOJTĚCH SMOLA, MIROSLAV PEJŠA A RADIM KOPŘIVA

**KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ KOTLOVÝCH TRUBEK POMOCÍ VIZUÁLNÍ A KAPILÁRNÍ METODY NDT..... 229****INSPECTION OF WELDED JOINTS OF BOILER TUBES USING VISUAL AND PENETRATION NDT METHODS**

VILÉM ŠAFAŘÍK, ZBYNĚK BUNDA, DOMINIK FINK A JOSEF VOLÁK

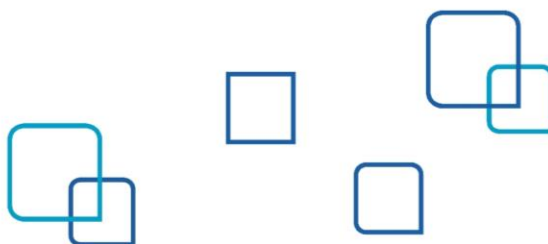
**HODNOCENÍ KOROZNÍHO CHOVÁNÍ AUSTENITICKÉ OCELI 08CR18NI10TI ZA VYSOKÝCH PARAMETRŮ VODY ..... 233****EVALUATION OF CORROSION BEHAVIOR OF AUSTENITIC STEEL 08CR18NI10TI EXPOSED TO HIGH PARAMETERS OF WATER**

MONIKA ŠÍPOVÁ A DANIELA MARUŠÁKOVÁ

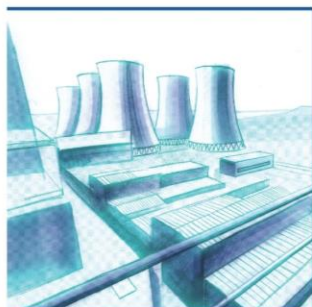
**MĚŘENÍ TORZNÍCH VIBRACÍ TELEMETRICKÝMI SYSTÉMY ..... 237****MEASUREMENT OF TORSIONAL VIBRATIONS USING TELEMETRY SYSTEMS**

JAROSLAV VÁCLAVÍK A RADKA MUSILOVÁ

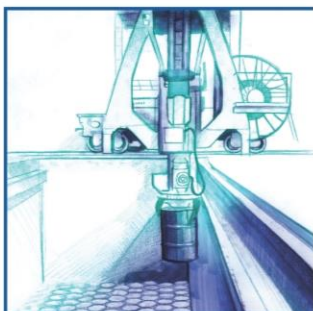
**REJSTŘÍK AUTORŮ ..... 241**



**Bezpečný  
a efektivní  
provoz  
energetických  
zařízení**



**Projektování  
a související  
inženýrské  
služby**



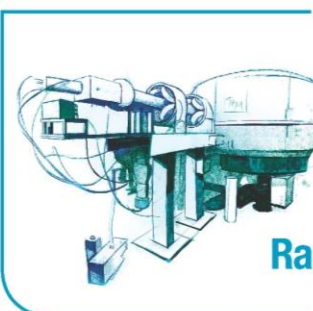
**Nakládání  
s radioaktivními  
i dalšími  
odpady**



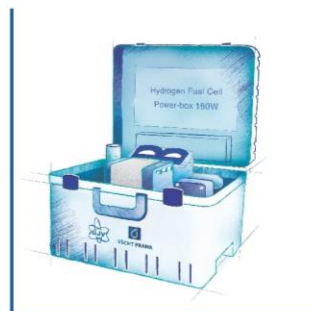
**Vyřazování  
jaderných  
zařízení  
z provozu**



**Vodíkové  
technologie**



**Radiofarmaka**

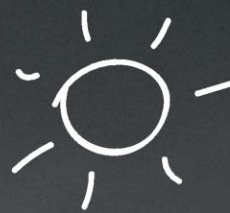






ČEZ ESCO

- 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







## Defektoskop OmniScan® X3



### Spolehlivost, kterou můžete zažít

Výjimečné zobrazení a promyšleně navržený software - vyšší standard v přístroji phased array. Přístroje Omniscan jsou známé svojí spolehlivostí a jednoduchostí použití - X3 nabízí ještě lepší vlastnosti pro detekci nejrůznějších vad materiálů.

**TFM** (Total Focusing Method) a **FMC** (Full Matrix Capture) techniky s podporou **64 elementové aktivní apertury**.

**Vylepšené Phased Array zobrazení** včetně inovativní **live TFM obálky a simulátoru mapy akustického vlivu** (Acoustic Influence Map - AIM) pro TFM techniku.

Vytvořte si **komplexní skenovací plán v jednom kroku** a ověřte si jeho nastavení pomocí vizualizačních nástrojů. **Sdílejte obraz** ze svého defektoskopu s kolegy použitím Olympus Scientific Cloud.

Olympus a OmniScan jsou registrovanými známkami společnosti Olympus.

Scientific Solutions Division  
**OLYMPUS CZECH GROUP, S.R.O., ČLEN KONCERNU**

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6 | Tel.: +420 221 985 211 |  
info-industrial@olympus.cz | www.olympus.cz

Více informací na [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)







# CVŘ

Centrum výzkumu Řež

Člen Skupiny ÚJV a dceřiná společnost ÚJV Řež, a.s.

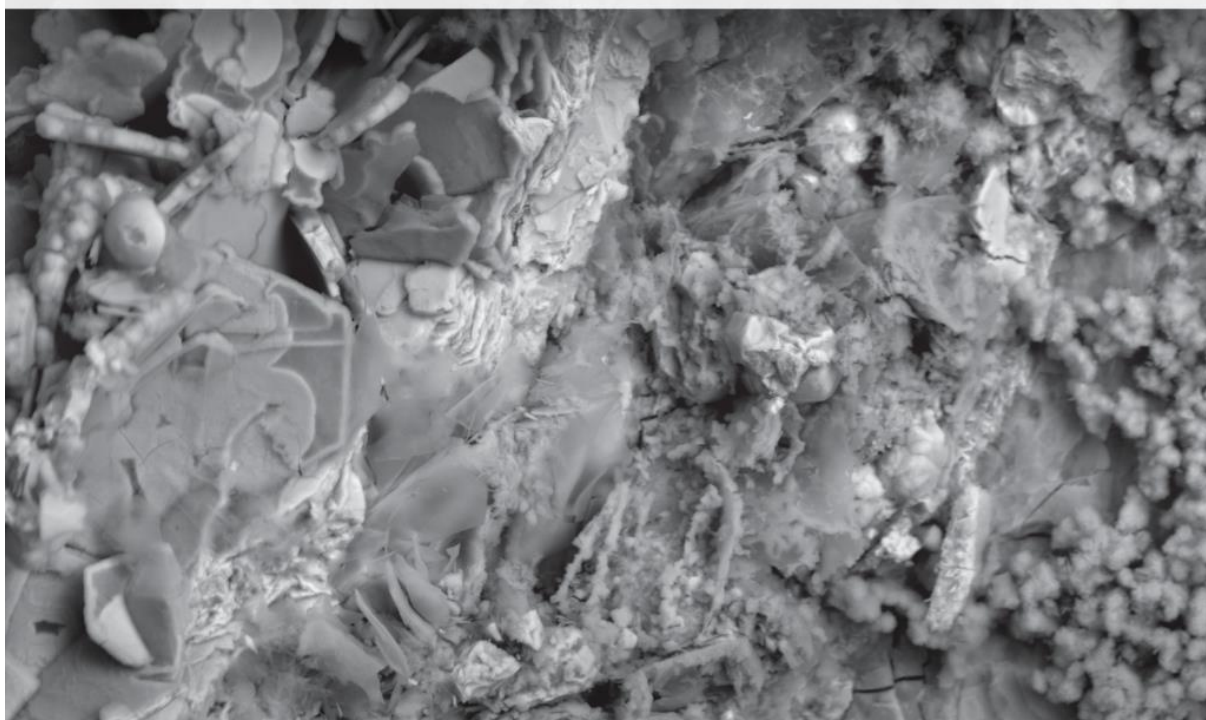
Výzkumná organizace zaměřená na výzkum, vývoj a inovace  
v oboru energetiky, zejména jaderné.

Provozovatel velkých výzkumných infrastruktur  
(reaktor LR-0, reaktor LVR-15, horké komory, diagnostické centrum, technologické smyčky).

Podporovatel základního a aplikovaného výzkumu v různých oblastech energetiky.

Zástupce ČR ve vrcholném orgánu Evropské aliance pro výzkum v energetice EERA  
(European Energy Research Alliance).

Člen a spoluzakladatel Technologické platformy „Udržitelná energetika ČR“.







STARMANS electronics je inženýrská a výrobní společnost, která poskytuje pokročilé technologické produkty a **řešení pro nedestruktivní testování a vyhodnocení**. Vyvíjíme, navrhujeme a vyrábíme přenosná ultrazvukové zařízení a průmyslové systémy pro ultrazvukovou, infračervenou, magneto-práškovou inspekci a X-ray testování, **Telemetrické systémy, Power systémy na SiC platformě** pro energetická zařízení (např. **vyrovnávací zdroje pro různé typy elektráren**) a dopravní prostředky.

## DIO 3000, DIO 3000 LP (mini)

**Telemetrická stanice - nově miniaturní verze a bezdrátový monitoring - různé typy senzorů a použití: energetika, plynárenství, vodní hospodářství**

### Telemetrické stanice v energetice

- 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 přenosné ultrazvukové defektoskopy

**Defectobook® DIO1000 PA nyní umožňuje zobrazování v režimu Phased Array**

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, monitoring transformátorů, izolátorových materiálů izolátorů, monitoring v plynárenství
- **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



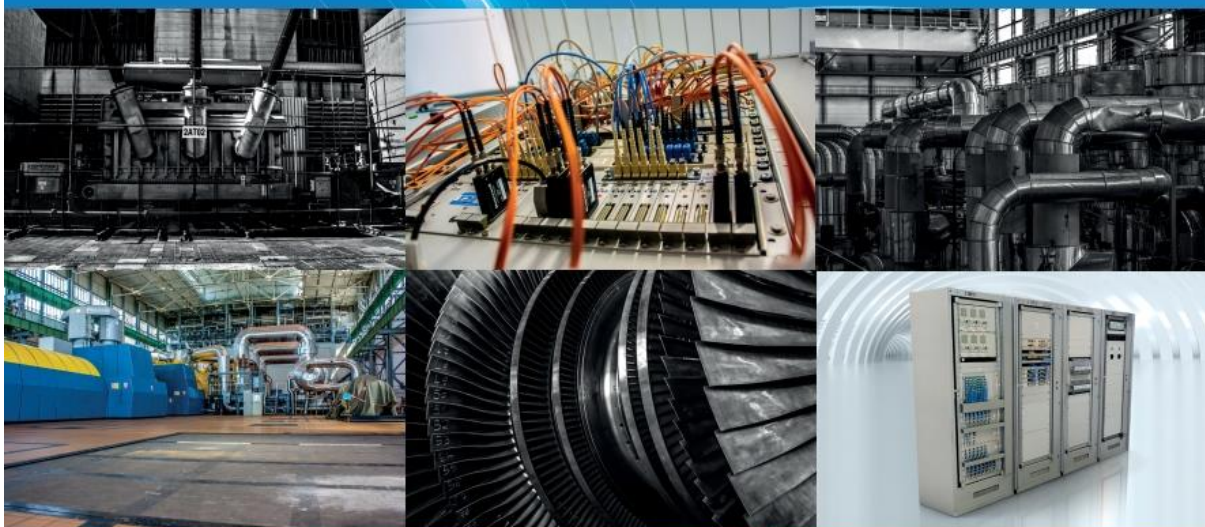




[www.tes.eu](http://www.tes.eu)

## Inženýrské služby v jaderné energetice

- Servis a údržba zařízení JE
- Deterministické analýzy bezpečnosti
- Monitorovací a diagnostické systémy
- Podpora spouštění a provozu JE
- 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)





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



Ecol je profesionální a nezávislá společnost specializující se na komplexní služby v oblasti

Olejového hospodářství, outsourcingu mazacích služeb, tribodiagnostiky a průmyslového čištění

#### Hydrodynamické čištění

- čištění vodním paprskem až 3 000 bar (výměníky, kondenzátory, potrubí, instalace, provozy, venkovní objekty)

#### Servis olejových a hydraulických systémů

- čištění olejových a hydraulických systémů
- filtrace a čištění, regenerace olejových náplní
- sušení a dehydratace olejů
- filtrace, sušení, regenerace trafo olejů

#### Chemické čištění, konzervace

- chemické čištění instalací (čištění kotlů, vyvárky, profuky, čištění výměníků, kondenzátorů, potrubí, instalací)
- konzervace zařízení, technologií

#### Ecol Fluid Management – outsourcing mazání

- distribuce olejů a maziv
- správa olejového hospodářství a mazacích služeb
- implementace Lubrication Managementu dle ICML 55.1
- IT řešení pro Lubrication Management
- audity mazacích služeb

#### Tribodiagnostika a poradenství

- akreditovaná laboratoř dle EN ISO 17025
- diagnostika olejů v nezávislé laboratoři
- diagnostika plastických maziv z 1g vzorku
- root cause analyses
- poradenství při výběru vhodných maziv
- testování oxidační odolnosti olejů

ICML 55.1 ready – implementace Lubrication Managementu



Ecol certifikáty a ocenění:



Ecol Industrial s.r.o. tel.: +420 317 842 227 GSM: +420 774 663 320 [www.ecolindustrial.cz](http://www.ecolindustrial.cz)





**UnionOcel**

Váš ocelový partner

# Otěruvzdorné plechy

Plechý, výpalky  
a komponenty  
**300–600 HB**

**DUROSTAT**

**DILLIDUR**

**XAR**

**CREUSABRO**

**BRINAR 400Cr**

**QUARD**

**X120 Mn 12**

**toughcore®**

**DUROSTAT 400/450**

Speciální  
návarové materiály  
**650–1000 HV**

**CORODUR**

Vše z našeho  
skladového  
a servisního centra  
v Koprivnici



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





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, 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“
- Spolupořádání mezinárodních konferencí „METAL“, „NANOCON“, konferencí o struktuře materiálů a mikromechanice lomu (MSMF), „COMAT“ a česko-slovenských konferencí „Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů“
- Spolupořádání národních konferencí „Životnost komponent energetických zařízení“ a „Dny tepelného zpracování“
- Organizování účasti českých doktorandů na mezinárodních konferencích Junior Euromat v Lausanne

## Mezinárodní spolupráce

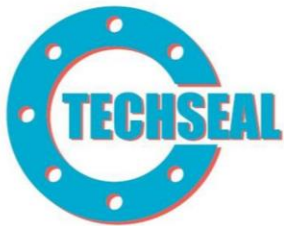
- Federation of European Materials Societies (FEMS)
- The European Network of Materials Research Centres (ENMAT)

Sídlo ČSNMT

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







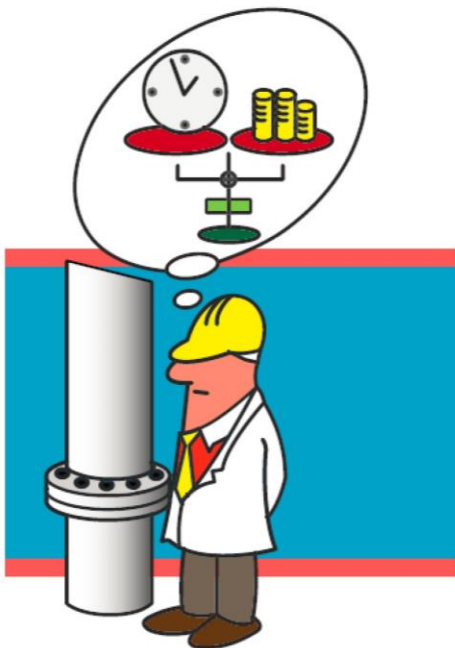
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

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.

Černokostecká 128/161

102 00 PRAHA 10

[technici@techseal.cz](mailto:technici@techseal.cz)

tel.: +420 602 337 058





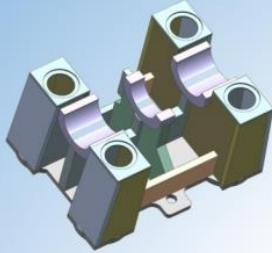


FAKULTA STROJNÍ  
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY  
V PLZNI

REGIONÁLNÍ  
TECHNOLOGICKÝ  
INSTITUT

## REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT

VÁŠ PARTNER PRO VĚDU, VÝZKUM A SPOLUPRÁCI



Digitální inženýring

Silniční vozidla

Aditivní výroba

Kolejová vozidla

Materiálové inženýrství

Strojírenství

**Laboratoř pro virtuální prototyping**

**Laboratoř kovové aditivní výroby**

**Metalografická laboratoř**

**Laboratoř experimentálního tváření**

**Mechanická zkušebna**

**Zkušebna provozní pevnosti a únavové životnosti**

**Laboratoř strojírenských experimentálních metod**

**Laboratoř technologie obrábění**

**Laboratoř dílenské metrologie**



Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta strojní  
Regionální technologický institut  
Univerzitní 8  
301 00 Plzeň  
Česká republika

T : +420 377 638 701

E : [rti@rti.zcu.cz](mailto:rti@rti.zcu.cz)

[www.rti.zcu.cz](http://www.rti.zcu.cz)







service s.r.o.  
Mladotice

## Nedestruktivní testování materiálů

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

- Metalografické repliky
- Měření tloušťek (UTT)
- Kapilární zkoušení (PT)
- Vizuální zkoušení (VT)
- Magnetické zkoušení (MT)
- Zkoušení ultrazvukem (UT)
- Měření tvrdosti
- Svářečský dozor







## Inženýrská akademie České republiky

Inženýrská akademie České republiky, z. s. (IA ČR) je nezávislá organizace – výběrové sdružení fyzických osob. Společným zájmem jejích členů je podpora a rozvoj technických disciplín odrážející technické, ekonomické, sociální, environmentální a kulturní potřeby společnosti. Byla založena v roce 1995 a jejím hlavním úkolem je rozvíjet a propagovat technické vědy, sblížovat výzkumnou sféru se sférou průmyslovou, přispívat ke zvyšování konkurenceschopnosti České republiky a její ekonomiky a dalšímu rozvoji systému technického vzdělávání.

IA ČR využívá odborné znalosti svých členů k vlastnímu výzkumu a poskytování expertních a poradenských služeb v oblasti technických věd. Aktivity odborných sekcí IA ČR pokrývající celé spektrum technických inženýrských oborů a Czech Knowledge Transfer Office zahrnují konzultace a informační činnost týkající se mimo jiné technického výzkumu, vývoje a inovací, mezinárodní výzkumné a technologické spolupráce a legislativy.

Inženýrská akademie oceňuje vynikající výsledky dosažené v oblasti výzkumu, vývoje a inovací. Každoročně od roku 1997 uděluje Cenu IA ČR význačným osobnostem a kolektivům z České republiky i ze zahraničí za vynikající výsledek tvůrčí práce – vynikající realizovaný technický projekt či významný přínos k rozvoji inženýrského výzkumu.

Na mezinárodním poli reprezentuje IA ČR zájmy České republiky jako řádný člen CAETS (International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences) a Euro-CASE (European Council of Academies of Applied Sciences, Technologies and Engineering). Inženýrská akademie se podílí na mezinárodních projektech a platformách obou sdružení řešených mezinárodními týmy vysoce kvalifikovaných odborníků, do kterých nominuje své členy a další významné odborníky z České republiky. Výsledky těchto projektů šíří v ČR. V rámci Euro-CASE se podílí na strategickém poradenství pro Evropskou Komisi a další orgány EU.

Inženýrská akademie Vám nabízí své partnerství a spolupráci v oblasti technického vzdělávání, ve výzkumu a vývoji, konzultace a zpracování expertíz.

### **Kontakt**

Inženýrská akademie České republiky, z.s.

Národní 3

110 00 Praha 1

e-mail: [eacr@eacr.cz](mailto:eacr@eacr.cz)

web: [www.eacr.cz](http://www.eacr.cz)





## **ANALÝZA VLIVU MÍSENÍ ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU NA FUNKCI SPALOVACÍCH TURBÍN A DMYCHADEL**

### **ANALYSIS OF THE EFFECT OF MIXING NATURAL GAS AND HYDROGEN ON THE FUNCTION OF COMBUSTION TURBINES AND BLOWERS**

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r.o., Brno

#### **Abstrakt**

Evropská komise prosazuje jako prioritu využití vodíku jako součást dekarbonizační politiky Evropské komise. Z tohoto důvodu dostala firma NET4GAS za úkol přimíchávat vodík do zemního plynu postupně tak, že po roce 2040 se přejde na spalování čistého vodíku. Proto jsme se zabývali problematikou vlivu tohoto procesu na funkci spalovací turbíny GT 750-6 a turbodmychadla TD - 260-14 - 1M/TS. V článku budou prezentovány základní rozdíly mezi fyzikálními vlastnostmi zemního plynu a vodíku. Dále budou sděleny výsledky výpočtu pracovního cyklu spalovací turbíny GT 750-6 s palivem zemní plyn a s palivem zemní plyn plus vodík. Bude rovněž analyzován vliv příměsi vodíku na funkci turbokompresoru.

#### **Abstract**

The European Commission promotes the use of hydrogen as a priority as part of the European Commission's decarbonisation policy. For this reason, the NET4GAS company was given the task of gradually mixing hydrogen into natural gas so that after 2040 it will switch to burning pure hydrogen. Therefore, we dealt with the issue of the influence of this process on the function of the GT 750-6 combustion turbine and TD -260 – 14 – 1M/TS turbocharger. The article will present the basic differences between the physical properties of natural gas and hydrogen. Furthermore, the results of the calculation of the working cycle of the GT 750-6 combustion turbine with natural gas fuel and with natural gas plus hydrogen fuel will be communicated. The influence of hydrogen admixture on the function of the turbo compressor will also be analyzed.

## Porovnání fyzikálních vlastností zemního plynu a vodíku

Vybrané důležité fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Vybrané důležité fyzikální vlastnosti zemního plynu a vodíku

Veličina	Jednotka	Zemní plyn	Vodík
Hustota (plyn)	kg Nm <sup>-3</sup>	0,7	0,1
Hustota (kapalina)	kg Nm <sup>-3</sup>	430–470	70,8
Molární hmotnost	kg mol <sup>-1</sup>	cca 17	2
Dolní mez výbušnosti	obj %	4,4	4
Horní mez výbušnosti	obj %	17	77
Bod varu při 1 bar (a)	°C	-163,5	-252,8
Spodní výhřevnost	MJ kg <sup>-1</sup>	49	120
Spodní výhřevnost	MJ m <sup>-3</sup>	34	10
Stechiometrická teplota spalování	°C	1963	2203
Laminární rychlost proudění	cm s <sup>-1</sup>	30–40	200–300
Rozsah zápalnosti ve směsi se vzduchem	%	5–15	4–75
Velikost molekuly	m <sup>-12</sup>	380	289
ATEX	-	II A	II C

### Spalovací proces

Jak je známo, zemní plyn je směs uhlovodíků, z nichž největší podíl má metan (cca 98 % obj.), dále obsahuje velmi malé množství oxidu uhličitého a dusíku (cca 1,1 % obj.) Symbolický chemický vzorec paliva je obecně ve tvaru C<sub>n</sub> H<sub>m</sub> O<sub>p</sub> N<sub>r</sub>, kde:

- **n** je počet atomů uhlíku,
- **m** počet atomů vodíku,
- **p** počet atomů kyslíku,
- **r** počet atomů dusíku.

Pro jednotlivé směsi bude symbolický chemický vzorec paliva tento:

- zemní plyn: C<sub>1,028</sub> H<sub>4,034</sub> O<sub>0,008</sub> N<sub>0,007</sub>,
- zemní plyn + 5 % H<sub>2</sub>: C<sub>0,978</sub> H<sub>3,934</sub> O<sub>0,008</sub> N<sub>0,007</sub>,
- zemní plyn + 50 % H<sub>2</sub>: C<sub>0,528</sub> H<sub>3,034</sub> O<sub>0,008</sub> N<sub>0,007</sub>,
- 100 % H<sub>2</sub>: C<sub>0,000</sub> H<sub>2,000</sub> O<sub>0,000</sub> N<sub>0,000</sub>.

Při spalování těchto paliv s vlhkým vzduchem bez disociace vzniknou spaliny, které obsahují CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O; N<sub>2</sub>; O<sub>2</sub> a termodynamické vlastnosti těchto spalin (izobarická měrná tepelná kapacita a entalpie) budou pro všechna paliva velmi blízká, a proto také expanze v turbíně bude podobná. Výsledky výpočtu spalovací turbíny GT 750-6 budou prezentovány při přednášce.

Základní rozdíly vznikají při samotném procesu spalování ve spalovací komoře.



## Hlavní parametry, které ovlivní spalování paliva ve spalovací komoře

### Laminární rychlost proudění

Protože vodík má přibližně 10x větší rychlost hoření, je vážný problém při konstrukci směšovací komory u kinetického spalování. Zde musíme zabránit prošlehnutí plamene do směšovací oblasti a tím k havárii hořáku (flashback). Rovněž je nutno řešit konstrukci tak, aby nedocházelo k pulsačnímu hoření. Jednodušší situace je u difúzního způsobu spalování, kde se palivo a vzduch přivádí odděleně.

### Stechiometrická teplota spalování

Vyšší střední teplota v primární části spalovací komory vede k vyšším emisím NO<sub>x</sub> a vyšším nárokům na chlazení plamence. Protože se zvyšováním podílu H<sub>2</sub> v palivu prakticky nemění přebytek vzduchu, jsou možnosti, jak proces chlazení plamence zvládnout i pro vyšší teploty plamene. Zvýšení produkce NO<sub>x</sub> při mísení více jak 60 % H<sub>2</sub> lze očekávat až o 50 %. Proto je použití kinetického způsobu spalování nutné.

### Vyšší mez výbušnosti a rozsahu zápalnosti ve směsi se vzduchem

Tato skutečnost vede k použití citlivějších senzorů a k použití vyššího konceptu zabezpečení pro splnění normy APEX.

### Barva plamene

Vodík má bezbarvý plamen, a proto je nutné použít nové citlivější senzory pro hlídání plamene. Je nutný nový systém zabezpečení.

### Velikost molekul vodíku

Přítomnost vodíku způsobuje vodíkovou křehkost. Vodíková křehkost je závislá na použitém materiálu, na koncentraci vodíku a na tlaku. Čím vyšší je tlak, tím je nižší dovolená koncentrace vodíku. Vodík má schopnost pronikat do materiálové struktury některých slitin ocelí. Na hranicích zrn reaguje s uhlíkem a vytváří metanové bubliny.

### Vliv příměsi vodíku na funkci turbokompresoru

Rovnice pro měrnou práci kompresoru má tvar:

$$e = \frac{\kappa}{\kappa-1} * Z * \frac{8314}{M} * T_1 * [ \varepsilon^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} - 1 ] . \quad (1)$$

Význam členů v rovnici (1) je uveden v tabulce 2.

Tab. 2: Popis veličin k rovnici (1)

veličina		jednotka	Zemní plyn	Vodík
ε	stlačení	[-]	1,3	1,3
T <sub>1</sub>	teplota v sání	[K]	293,15	293,15
e	měrná práce	[kJ kg <sup>-1</sup> ]	36	340
κ	Poissonova konstanta	[-]	1,35	1,45
Z	kompresibilní faktor	[-]	0,9	1
M	molární hmotnost	[kg Kmol <sup>-1</sup> ]	17	2

Z parametrů je zřejmé, že práce kompresoru se zemním plynem a s vodíkem bude velmi rozdílná.

**Závěr**

Práce spalovací turbína a dmyhadla na zemní plyn s příměsí vodíku je možná za dodržení podmínek, které jsou uvedeny v textu. Náhrada zemního plynu vodíkem je, dle mého názoru, nereálná.

**Literatura**

- [1] VESELÝ, Stanislav. Spalovací komory spalovacích turbín. Brno: Galant Brno, 2007. ISBN 80-239-6657-X.
- [2] SKOUPÝ, Aleš. Vliv spalování směsi zemního plynu a vodíku na chod plynových turbín. In: *Konference KOTLE 2023*. Brno, 2023.
- [3] BŘEZINA, Luboš. Vliv příměsí vodíku na práci turbokompresoru. In: *Konference KOTLE 2023*. Brno, 2023.
- [4] JIRKŮ, Radek. Uhlí – současnost a budoucnost v ČR. In: *Konference KOTLE 2023*. Brno, 2023.

# NEBEZPEČÍ KŘEHKÉHO POŠKOZENÍ OCELÍ V PROSTŘEDÍ SMĚSI ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU

## RISK OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT IN A MIXTURE OF NATURAL GAS AND HYDROGEN

Klára Kuchťáková, Darya Rudomilova, Václav Šefl a Tomáš Prošek

Technopark Kralupy, VŠCHT Praha

### Abstrakt

Vodíkové křehnutí ocelí je jedním z technických problémů spojených s přimícháváním vodíku do zemního plynu. Aby se předešlo bezpečnostním rizikům, je nutné stanovit podmínky, za kterých lze vodík přidávat do stávajícího systému, případně určit, které části je třeba modernizovat.

Interakce oceli a vodíku silně závisí na mikrostruktuře materiálu, stavu povrchu, parametrech prostředí a režimu namáhání. V prezentovaných předběžných výsledcích probíhajícího výzkumu je ukázán vliv jednotlivých parametrů a jejich potenciální synergický efekt na vstup a interakci vodíku s materiálem. Vybrané třídy běžných plynárenských ocelí byly vystaveny prostředím simulujícím reálné podmínky v plynárenské síti pro posouzení kritických parametrů prostředí, které zvyšují vstup vodíku do oceli. Byly změřeny difuzní vlastnosti vodíku v ocelích a provedena zkouška za pomalé rychlosti deformace při *in-situ* sycení vodíkem pro vyhodnocení náchylnost ocelí k vodíkovému křehnutí.

### Abstract

Hydrogen embrittlement of steel components is one of the technical challenges connected with hydrogen blending into natural gas. To avoid any safety risk, it is necessary to determine conditions under which hydrogen can be added to the existing natural gas system, or, eventually, to determine which parts need to be upgraded.

The steel-hydrogen interaction strongly depends on the material microstructure, surface state and environmental parameters. In the presented preliminary results, the effect of individual parameters and their potential synergetic effect on hydrogen uptake and interaction with material is studied. Selected grades of pipeline steels were exposed to environments simulating real conditions in gas industry facilities to assess the critical environmental parameters that enhance the entry of hydrogen into steel. Hydrogen diffusion properties in steels were measured and slow-strain rate test (SSRT) under *in-situ* hydrogen charging was conducted to evaluate the susceptibility of steel to hydrogen embrittlement.

### Úvod

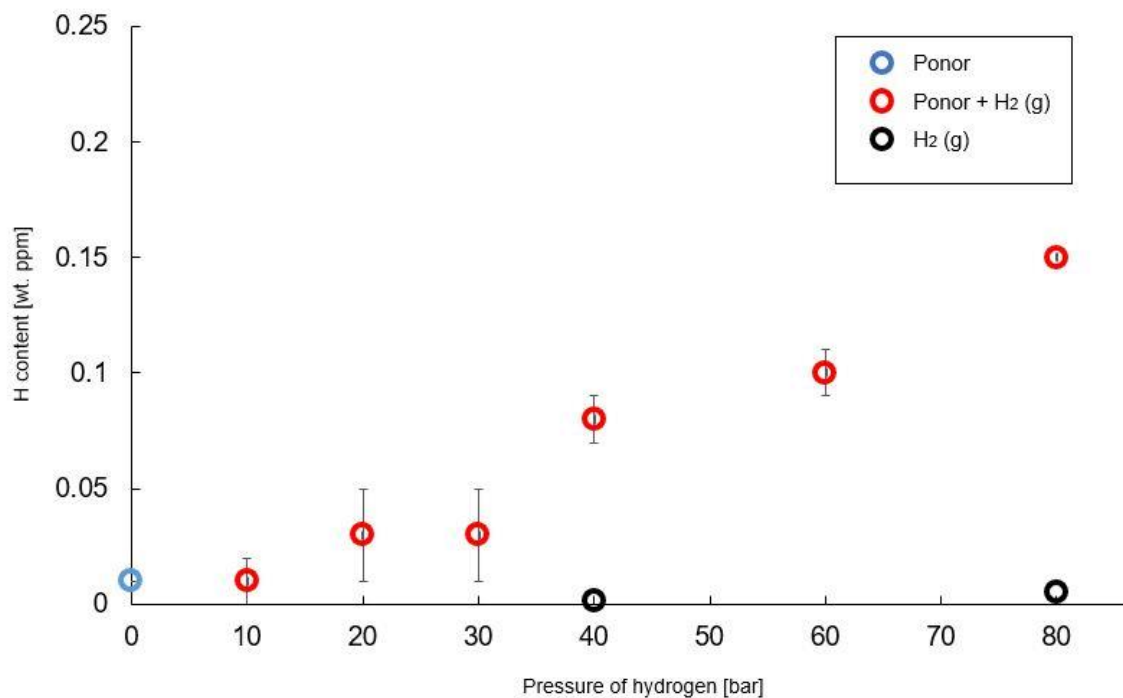
Plynárenský průmysl se připravuje na přimíchávání vodíku do zemního plynu s cílem zajistit bezpečné provozování současné sítě pro směs s 2-5 % vodíku v roce 2025. S vystavením převážně ocelových komponent sítě plynnému vodíku je spojené riziko vodíkového křehnutí, kdy dochází ke zhoršení mechanických vlastností ocelí v důsledku interakce s absorbovaným atomárním vodíkem. V závislosti na mikrostruktuře materiálu a vlastnostech prostředí může dojít k absorpci kritického množství vodíku, které vede až k selhání ocelové komponenty křehkým lomem. Pro minimalizaci rizik spojených s tímto fenoménem je v první řadě potřeba porozumět vlivu jednotlivých faktorů v prostředí tlakového vodíku ve směsi se zemním plynem na vstup vodíku do struktury oceli, vlivu absorbovaného vodíku na mechanické vlastnosti a následně stanovit podmínky, za kterých lze vodík bezpečně přidávat do stávající transportní, skladovací a distribuční soustavy. Experimentální výzkum s cílem vytvořit praktický nástroj pro hodnocení rizika vodíkového křehnutí ocelí v plynárenské síti probíhá v Technoparku Kralupy Vysoké

školy chemicko-technologické v Praze ve spolupráci s Gas Storage CZ, Ústavem teoretické a aplikované mechaniky AV ČR a SVÚM a.s.

### Vliv parametrů prostředí na vstup vodíku

V případě přidávání vodíku do existující plynárenské infrastruktury je potřeba uvažovat dva zdroje vodíku v materiálu. Vedle vodíku vznikajícího fyzikálně-chemickým mechanismem z plynné fáze může jít také o korozně indukovaný vodík, který do materiálu vstupuje elektrochemickým mechanismem v důsledku katodické korozní reakce, pokud je materiál v kontaktu s roztokem elektrolytu nebo v prostředí s vyšší vlhkostí. V environmentálně pestré části plynárenské infrastruktury, jako jsou zásobníky plynu, může v závislosti na fázi zpracování ukládaného nebo těženého plynu dojít ke třem situacím: kontakt oceli se suchým plynem, kontakt oceli s vlhkým plynem nebo přímý kontakt oceli s vodnou fází, která je sama v kontaktu s tlakovým plynem. Vodnou fází v podmínkách zásobníků může být ložisková voda, kondenzát brýdových par nebo procesní kapaliny jako je etylenglykol.

*Termální desorpční analýza* množství absorbovaného vodíku ve struktuře oceli po expozici vzorků v prostředí simulujícím výše popsané podmínky dovoluje určit místa, kde lze v budoucnosti očekávat nejvyšší vstup vodíku do oceli [1]. Jak ukazují výsledky na obr. 1, takovými místy budou zejména oblasti, kde dojde ke kombinaci přítomnosti plynného vodíku a vodné fáze jako zdroje korozně indukovaného vodíku. Tento synergický efekt je pak řízen především vlastnostmi vodné fáze a tlakem plynného vodíku.



Obr. 1: Množství absorbovaného vodíku do struktury referenční oceli DC01 dle EN 10130 v prostředích simulujících podmínky plynárenské sítě v případě přimíchávání vodíku; modrý bod: korozně indukovaný vodík po expozici v roztoku 0,5 mol/l NaCl; černé body: vodík po expozici ve vysokotlakém plynném vodíku; červené body: vodík po expozici v kombinovaných podmínkách vodného roztoku 0,5 mol/l NaCl a vysokotlakého plynného vodíku

## Interakce vodíku se strukturou materiálu

Vodík, který vstupuje do materiálu v atomární podobě, prostupuje strukturou v závislosti na jeho rozpustnosti a difuzivitě v dané oceli. Tyto dvě proměnné jsou ovlivněny typem mřížky a hustotou a typem mřížkových defektů, které se chovají jako vodíkové pasti. Tzv. difuzibilní vodík, který je i za normálních provozních teplot v materiálu mobilní, je odpovědný za vodíkové křehnutí [2]. Materiálem difunduje do kritických míst, kde se akumuluje a může způsobit iniciaci nebo urychlení růstu trhliny a zhoršení mechanických vlastností materiálu.

Difúzní rychlost vodíku danou ocelí lze stanovit pomocí *elektrochemické permeační metody* [3]. Výstupem měření je závislost anodického proudu na čase, tzv. permeační křivka, ze které lze určit difúzní koeficient např. metodou časové prodlevy dle ISO 17081:2014, nebo hustotu vodíkových pastí dle rovnice [4]:

$$N_T = N_L \times \left( \frac{D_L}{D_{eff}} - 1 \right) \times e^{-\frac{E_b}{RT}} \quad (1)$$

kde  $N_T$  je počet pastí v jednotkovém objemu,  $N_L$  je počet intersticiálních poloh v jednotkovém objemu,  $D_L$  je difúzní koeficient v materiálu bez vodíkových pastí a  $E_b$  je vazebná energie vodíkových pastí.

Pro porovnání byly vybrány tři odlišné mikrostrukturní typy ocelí, které pokrývají široké spektrum tříd ocelí zastoupených v systému podzemního zásobníku plynu. Jejich chemické složení a mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 1.

Tab. 1: Pevnost v tahu a přibližné chemické složení vybraných tříd ocelí

Ocel	Pevnost v tahu [~MPa]	Chemické složení [hm. %]		
		C	Mn	Cr
Martenzitická ocel (M)	810	0,30	1,50	0,10
Feriticko-perlitická ocel (F-P)	520	0,10	1,10	0,10
Austenitická korozivzdorná ocel (A)	1100	0,04	1,80	18,3

Z výsledků permeační zkoušky výše zmíněných ocelí v tabulce 2 je zjevné, že rychlost difúze je funkcí hustoty pastí. Je také patrný obecný trend rychlosti difúze vodíku napříč mikrostrukturními typy ocelí. Difúze vodíku je nejvyšší pro feriticko-perlitické oceli, nižší pro martenzitické oceli a nejnižší pro austenitické korozivzdorné oceli.

Tab. 2: Difúzní parametry vodíku pro tři typické zástupce mikrostrukturních typů oceli v plynné síti

Ocel	Difúzní koeficient $D_{eff} \cdot 10^{-6} [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Hustota pastí $N_T \cdot 10^{24} [\text{cm}^{-3}]$
Martenzitická ocel (M)	2,6	3,6
Feriticko-perlitická ocel (F-P)	17,5	0,5
Austenitická korozivzdorná ocel (A)	$>9 \cdot 10^{-3}$	$>1000$

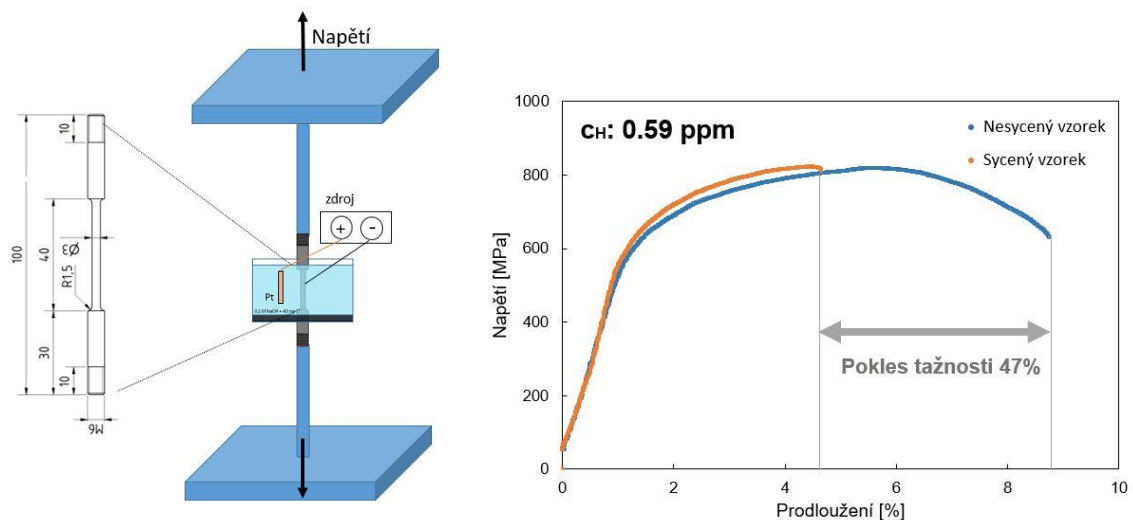
Rychlost difúze je důležitým materiálovým parametrem, poskytuje však informaci pouze o prostupu vodíku strukturou materiálu a nelze ji přímo spojit s náchylností oceli k vodíkovému křehnutí. Propojením s výsledky termální desorpční analýzy, poskytující informaci o absolutním množství absorbovaného vodíku i typu vodíkových pastí, a mechanických zkoušek v přítomnosti vodíku, pak lze vyhodnotit riziko vodíkového křehnutí.

## Vliv vodíku na mechanické vlastnosti materiálu

Porovnání tahových diagramů vzorků bez vodíku a za *in-situ* elektrochemického sycení vodíkem při tahové zkoušce při pomalé rychlosti deformace dovoluje vyhodnotit vliv vodíku na

mechanické vlastnosti, zejména tažnost. Fraktografická *post-mortem* analýza vzorků a stanovení absorbovaného množství vodíku v době lomu pak poskytují další důležité informace.

U výše zmíněné martenzitické oceli dochází za podmínek elektrochemického sycení vodíkem k poklesu tažnosti až o 47 % (obr. 2). Porovnání výsledků mechanických zkoušek tří mikrostrukturních typů ocelí, viz tabulka 3, dovoluje oceli seřadit podle náchylnosti k vodíkovému křehnutí. Martenzitická ocel je k vodíkovému křehnutí nejnáchylnější, což je spojené s vyšším množstvím absorbovaného vodíku v její struktuře v důsledku velkého množství vodíkových pastí ve struktuře kovu. Náchylnost feriticko-perlitické oceli je nižší než u martenzitické oceli a vyšší než u austenitické korozivzdorné oceli. Austenitická korozivzdorná ocel je k vodíkovému křehnutí nejméně náchylná i přesto, že do struktury absorbuje nejvíce vodíku.



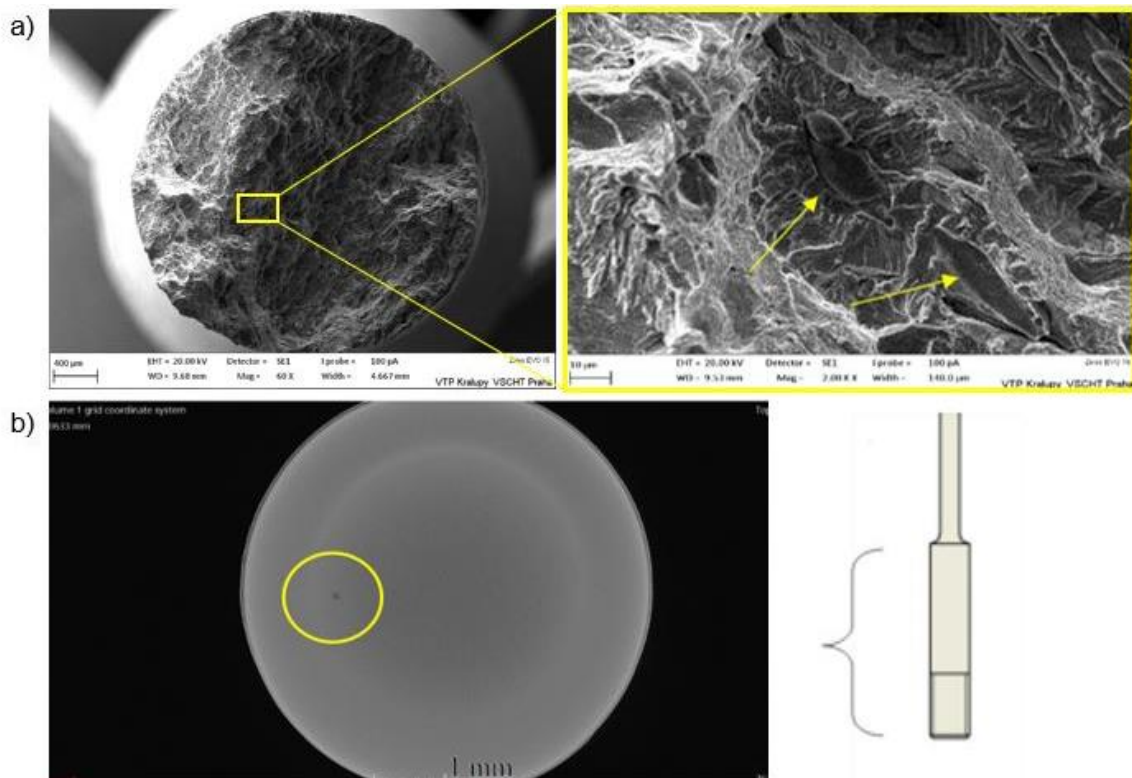
Obr. 2: Tahová křivka martenzitické oceli pro nesycený vzorek (modrá křivka) a vodíkem sycený vzorek (oranžová křivka) a schéma SSRT zkoušky; podmínky elektrochemického sycení:  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} \text{ NaOH} + 40 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{ CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ;  $10 \text{ mA/cm}^2$ , 48 hodin předsycení a in-situ sycení během zkoušky

Tab. 1: Vliv vodíku na mechanické vlastnosti tří tříd plynárenských ocelí a množství absorbovaného vodíku do jejich struktury během tahové zkoušky při pomalé rychlosti deformace; austenitická korozivzdorná ocel (A), martenzitická ocel (M), feriticko-perlitická ocel (F-P)

Vliv vodíku na:	Vysoký	→	Nízký
Pokles tažnosti	M	F-P	A
Pokles času do lomu	M	F-P	A
Relativní pokles lomové plochy	M	F-P	A
Množství absorbovaného vodíku	A	M	F-P

Náchylnost základní mikrostruktury oceli k vodíkovému křehnutí může být významně ovlivněna mikroskopickými defekty, jako jsou vměstky nebo dutiny. Jejich přítomnost významně mění mechanickou odezvu materiálu. Pomocí fraktografické analýzy bylo prokázáno, že u feriticko-perlitické oceli vede přítomnost sulfidických vměstků k iniciaci vodíkového křehnutí (obr. 3a). Za využití rentgenové mikrotomografie byla také detekována přítomnost dutin (obr. 3b), ve kterých může docházet k rekombinaci a akumulaci vodíku.





Obr. 3: Mikroskopické snímky defektů v mikrostručtuře feriticko-perlitických ocelí: snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu ukazující sulfidické vměstky (žluté šipky) jako místa iniciace křehkého lomu (a) a snímek z rentgenového mikro tomografu ukazující přítomnost dutin v objemu kovu (b)

## Závěr

Při hodnocení rizika vodíkové křehkosti ocelových materiálů v plynárenské infrastruktuře je nutné posoudit řadu faktorů. Stávající výsledky ukazují oblasti, kterým je potřeba v budoucnu věnovat pozornost. Z pohledu prostředí jsou to místa, kde může docházet k synergii mezi ko-rozně indukovaným vodíkem a plynným vodíkem. Z materiálového hlediska jde o ocelové komponenty s martenzitickou mikrostručtuřou nebo defekty jako jsou vměstky, dutiny či mikrotrhliny.

V rámci probíhajícího výzkumu je hodnocen vliv stavu povrchu, cyklického mechanického namáhání, přítomnosti svarů a defektů. Výstupem projektu bude systém hodnocení míry kritič-nosti jednotlivých částí plynárenské sítě z pohledu materiálového a provozního.

## Poděkování

Projekt je podpořen Technologickou agenturou České republiky v rámci programu Théta pod číslem TK05020150 a firmou Gas Storage CZ.

**Literatura**

- [1] RUDOMILOVA, D. - PROŠEK, T. - LUCKENEDER, G. Techniques for investigation of hydrogen embrittlement of advanced high strength steels. *Corrosion Reviews*, 2018, vol. 36, no. 5, p. 413-434.
- [2] DEPOVER, T. - WALLAERT, E. - VERBEKEN, K. On the synergy of diffusible hydrogen content and hydrogen diffusivity in the mechanical degradation of laboratory cast Fe-C alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 664, p. 195-205.
- [3] DEVANATHAN, M. - STACHURSKI, Z. The adsorption and diffusion of electrolytic hydrogen in palladium. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1962, vol. 270, p. 90-102.
- [4] DONG, C. F. - LIU, Z. Y. - LI, X. G. - CHENG, Y. F. Effects of hydrogen-charging on the susceptibility of X100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, no. 24, p. 9879-9884.



## MOBILNÍ PLNICÍ VODÍKOVÁ STANICE A VÝPOČETNÍ PODPORA PRO STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ PLNĚNÍ

## MOBILE HYDROGEN FILLING STATION AND CALCULATION SUPPORT FOR DETERMINING OPTIMAL FILLING PARAMETERS

Pavel Polach <sup>a)</sup>, Josef Lexa <sup>b)</sup>, Marek Bělohoubek <sup>a)</sup> a Jan Lazar <sup>a)</sup>

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

<sup>b)</sup> DEVINN s.r.o.

### Abstrakt

Jednou z možností snížení emisí v dopravním sektoru je využití vodíku jako paliva pro dopravní prostředky. Pro toto využití vodíku je nutné vystavět síť stacionárních plnicích vodíkových stanic, jejichž výstavba je ale časově náročná, finančně nákladná a v současné době se vyplatí pouze v určitých lokalitách. Z těchto důvodů bylo jako doplněk stacionárních stanic vyvinuto zařízení vynikající kombinací nízkých vstupních nákladů a schopností variabilního rozvozu a výdeje vodíku: mobilní plnicí vodíková stanice.

V příspěvku jsou shrnuty základní parametry prototypu mobilní vodíkové stanice a je prezentována výpočetní podpora pro stanovení optimálních parametrů plnění.

### Abstract

One of the options for reducing emissions in the transport sector is using hydrogen as a fuel for transport vehicles. For this use of hydrogen, it is necessary to build a network of stationary hydrogen filling stations. Still, construction is time-consuming, financially expensive, and only worthwhile in specific locations. For these reasons, a mobile hydrogen filling station was developed as a complement to stationary stations. This device has an excellent combination of low input costs and variable hydrogen delivery and dosing capabilities.

The paper summarizes the basic parameters of the mobile hydrogen station prototype and presents computational support for determining optimal filling parameters.

### Úvod

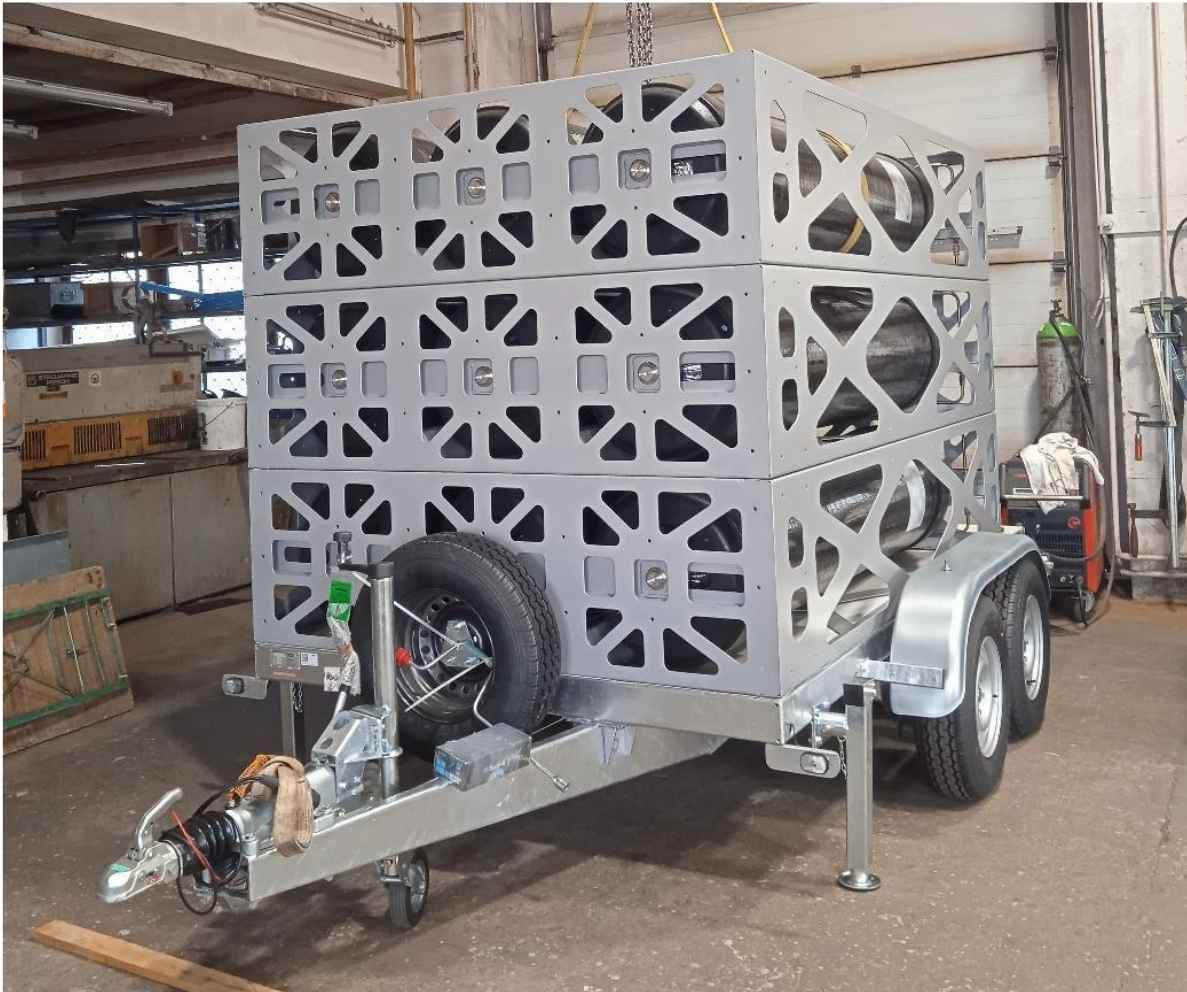
Snížení emisí oxidu uhličitého z dopravního sektoru je jedním z prostředků, jak snížit celkové emise skleníkových plynů, a tím přispět k dekarbonizaci všech sektorů do roku 2050 (viz např. [1]). S ohledem na strategii dekarbonizace dopravního sektoru, a to jak v hromadné, tak i osobní a nákladní dopravě, je nezbytné pro vodíkové technologie zajistit dostatek lokalit pro doplnění paliva. Z tohoto důvodu proběhl vývoj prototypu mobilní plnicí vodíkové stanice [2, 3], jejímž účelem je stát se doplňkem stacionárních plnicích stanic – tzn. poskytnout stejnou službu a zajistit ji v lokalitách, které nejsou nebo v nejbližší době nebudou pokryty sítí stacionárních stanic. Vyvinutá stanice bude sloužit jednak pro plnění vozidel, ale také pro plnění mobilních elektrocentrál s vodíkovými palivovými články, které návazně mohou plnit funkci mobilních nabíjecích stanic pro elektromobily nebo nezávislého zdroje elektrické energie.

V průběhu vývoje mobilní plnicí stanice bylo mj. nutné řešit původně neočekávanou problematiku: pro provoz stanice na nezchlazený vodík při ambientních teplotách totiž nelze pro návrh řízení plnění použít existující standardy (ve smyslu nastavení řídicích členů plnicí kaskády – rychlost plnění a doba zapojení jednotlivých lahví). Současná verze normy SAE J2601 „Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles“ [4] pokrývá pouze případy plnění pro předchlazený vodík na teploty  $-10\text{ °C}$  až  $-40\text{ °C}$ . Z tohoto důvodu byl vytvořen matematicko-výpočetní model (implementovaný do vlastního software v programovém prostředí MATLAB), který umožňuje simulovat plnění automobilových nádrží při uvažování značného množství variant vstupních parametrů (různé objemy a typy nádrží, různé teploty okolí a nádrže,

rozdílné počáteční tlaky v nádrži či v kaskádě plnicí stanice atd.) [5]. S využitím výsledků simulací bylo možné nastavit řídicí algoritmy zaručující bezpečné plnění všech zařízení, pro jejichž plnění je mobilní stanice určena.

### **Mobilní plnicí vodíková stanice**

Mobilní plnicí vodíková stanice (viz obr. 1) [3] je zařízení, které slouží ke snadnému transportu stlačeného vodíku a následnému plnění vodíkových vozidel nebo jiných zařízení k tomu přizpůsobených. Umožňuje plnit osobní automobily s provozním tlakem vodíku 700 bar, autobusy (nákladní automobily) s provozním tlakem vodíku 350 bar a manipulační techniku s tlakem 350 bar (se speciální koncovkou).



Obr. 1: Přívěs s mobilní plnicí vodíkovou stanicí

Mobilní stanice se skládá:

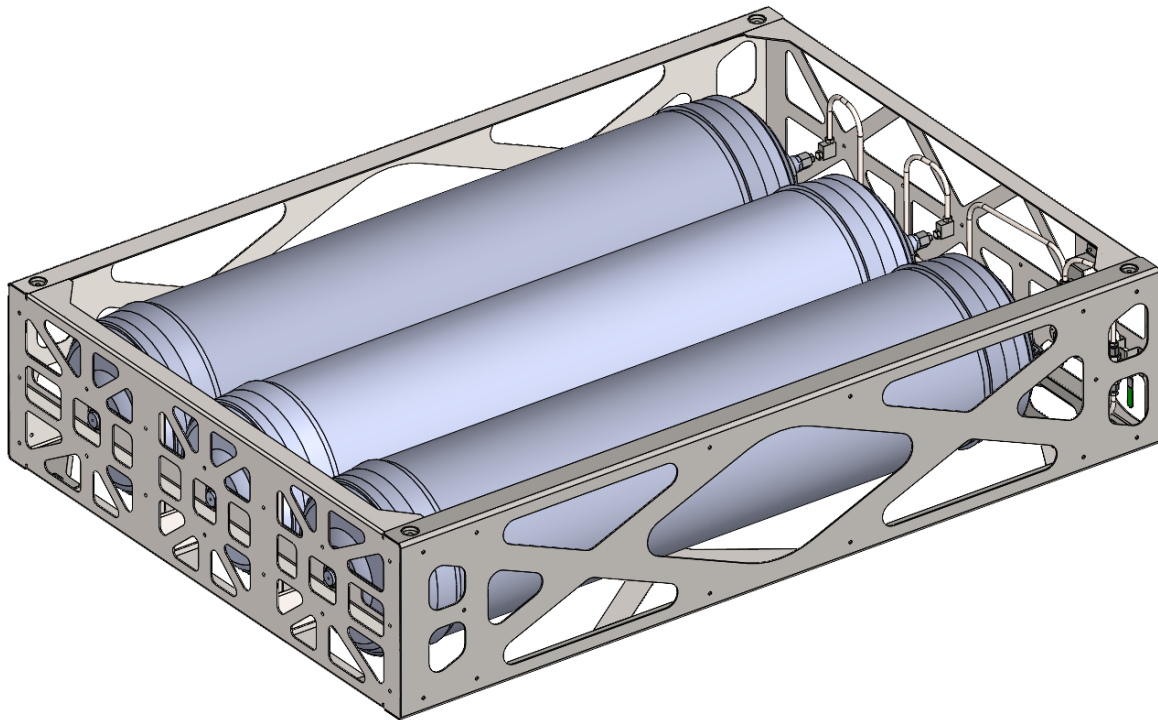
- ze zásobníku na stlačený vodík sestávajícího ze soustavy tří svazků s tlakovými lahvemi s dimenzovaným systémem kaskádových rozvodů a unikátním řídicím systémem pro maximální využití vodíku ze zásobníku (obr. 2),
- z přívěsného vozíku,
- z výdejního stojanu.

Vysokotlaký mobilní zásobník je realizován ze svazku 9 tlakových lahví o tlaku až 500 bar a umožňuje uskladnit téměř 100 kg vodíku. Svazek je umístěn v rámu, který zajišťuje bezpečnost lahví a jejich správnou funkci. Celý systém je konstruován tak, aby splňoval požadavky transportu za osobním automobilem. Stanice neobsahuje žádný kompresor na stlačování vodíku, je využíváno pouze přepouštění na základě rozdílných tlakových úrovní v plnicí stanici

a v plněném zařízení. Plnicí stanice má zásobu vodíku minimálně 90 kg a z toho 60 kg plně dostupných. Po vypotřebování 60 kg vodíku je možné natankovat relativně prázdné nádrže na nižší tlaky, a to do okamžiku vyrovnání tlaku mezi plnicí stanicí a plněným zařízením.

Aby byl využit maximální potenciál plnicí stanice, je rozdělena do tří tlakových úrovní. Bylo rozhodnuto o třech stejně objemných sekcích, kde každou sekci reprezentuje jeden svazek se třemi tlakovými lahvemi (viz obr. 2). Jeden svazek se kromě tlakových lahví a rámu skládá také z vysokotlakého rozvodu, manuálního ventilu, vysokotlakého manometru a rychlospojky. Svazky jednotlivých tlakových úrovní jsou propojeny pomocí funkčních armatur (elektromagnetické ventily, filtry, redukční ventily, pojišťovací ventily, vysokotlaké vedení atd.). Výběr této konfigurace je vhodný jak z hlediska konstrukčního (možnost replikovat stejný konstrukční prvek), tak z hlediska strategie přepouštění. Konfigurace, které jsou rozděleny do více než tří tlakových úrovní sice přináší jistou výhodu v možnostech přepouštění, ale zároveň také přináší značné komplikace při výrobě svazků.

Plnicí stanice vodík z tlakových lahví vydává a zároveň musí vodík do tlakových lahví přijímat. Příjem vodíku je ovládán manuálně v plném rozsahu a není potřeba mít k dispozici elektrickou energii. Naopak výdej vodíku je řízen poloautomaticky a je nutné mít elektrickou energii k dispozici.



Obr. 2: Svazek tlakových lahví

Rám svazku tlakových lahví je vyroben z ocelového plechu o tloušťce 3 mm. Byl použit materiál S355J2, který je vhodný pro technologii vypalování laserem a následné svařování. S využitím počítačových simulací byly jednotlivé plechové díly optimalizovány a jejich hmotnost maximálně snížena. Celková hmotnost rámu a nutných komponent pro montáž tlakových lahví je 193 kg. Svazek osazený lahvemi má hmotnost 767 kg.

Volba tlakových lahví byla ovlivněna požadavkem na jejich certifikaci pro převoz stlačeného vodíku (TPED /  $\pi$ ; „Transportable Pressure Equipment Directive“). Byly využity kompozitní lahve typu 4 značky Hexagon (obr. 3), každá o objemu 335 litrů. Při pracovním tlaku 500 bar pojme jedna lahev až 10,6 kg vodíku, celý svazek tedy pojme až 31,8 kg vodíku.



Lahve odpovídají standardům:

- ČSN EN 12245 („Lahve na přepravu plynů – Plně ovinuté kompozitové lahve“),
- ATR D 1/21 EN 17339 („Anerkanntes Technisches Regelwerk, Ortsbewegliche, vollumwickelte Flaschen und Großflaschen aus Kohlenstoff-Verbundwerkstoffen für Wasserstoff“ = „Uznávané technické předpisy“; norma na „Přenosné, plně zabalené lahve a velké lahve vyrobené z uhlíkových kompozitních materiálů na vodík“),
- 2010/35/EC, ADR („Accord Dangereuses Route“, tj. Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí).



Obr. 3: Tlakové lahve Hexagon

Jeden kilogram vodíku umožňuje získat cca 33 kWh použitelné energie. Pokud uvažujeme o účinnosti systému přeměny na elektrickou energii přibližně 50 %, lze z jedné mobilní plnicí vodíkové stanice získat až 524 kWh elektrické energie.

Ve spolupráci se společností Agados, spol. s r.o. byl vyroben přívěsný vozík, jehož rám je konstrukčně uzpůsobený pro převoz a uchycení svazků (viz obr. 1). Řešilo se zejména správné vyvážení sil působících na tažné zařízení vzhledem k těžišti převážené mobilní plnicí vodíkové stanice. Vozík je vybaven čtyřmi opěrnými nohama, kterými lze vozík, respektive mobilní plnicí stanici stabilizovat, případně vodorovně ustavit před začátkem plnění.

Aby bylo možné mobilní plnicí vodíkovou stanici provozovat, bylo nutné získat následující certifikace:

- **Certifikaci svazku pro uložení a transport vodíku.** Podmínkou certifikace bylo využití tlakových lahví a uzavíracího ventilu s certifikací TPED /  $\pi$ . Pevnost navržené mechanické konstrukce svazku byla ověřena výpočtem. Na vyrobeném svazku byla testována kvalita provedení svařovaných spojů, byla provedena pádová zkouška, a nakonec byla ověřena těsnost celé sestavy tlakovou zkouškou. Takto prověřeny

a certifikovaný svazek lze využít na převoz a skladování vodíku nejen pro mobilní plnicí stanici, ale i pro další aplikace, ve kterých jsou nyní využívány svazky s ocelovými tlakovými lahvemi.

- **Certifikaci vodíkových rozvodů mimo vlastní svazek.** Komponenty na výdejním zařízení nemají certifikaci TPED /  $\pi$ . Z tohoto důvodu je nutné tuto část převážet v beztlakém stavu. Tento způsob rozdělení svazků a výdejní části byl schválen revizním technikem. Po propojení a montáži výdejního zařízení byla provedena tlaková zkouška.
- **Certifikaci celého zařízení.** Aby bylo možné mobilní plnicí vodíkovou stanicí komerčně nabízet a provozovat, bylo nutné, aby získala certifikaci CE (pozn. CE certifikát označuje výrobky, které vyhovují právním předpisům Evropské unie, a tak se mohou volně prodávat na evropském trhu). Tuto certifikaci vydává výrobce na základě posouzení shody s technickými požadavky na zařízení.

### Výpočetní podpora pro stanovení optimálních parametrů plnění

Plnicí proces vodíku do (nejen) automobilové nádrže má určitá specifika. S ohledem na nízké protonové číslo je vodík velice lehkým plynem a pro načerpání jeho většího váhového množství je nutné ho do nádrže dodávat pod velmi vysokým tlakem (řádově až desítky MPa). Nádrže, stejně jako plnicí stanice jsou tak představovány souborem jedné či více silnostěnných tlakových lahví, mezi nimiž probíhá přepouštění plynu, a to buďto nucené (např. pomocí kompresoru) či samovolné (na bázi vyrovnávání tlaků).

V průběhu přečerpávání paliva dochází k prudké změně teplotně-tlakových poměrů v plnicí stanici i v plněném zařízení, což může vést až k nadměrnému ohřevu vodíku v objemu nádrže a tím i k porušení podmínek bezpečného provozu plněného zařízení. Z toho důvodu byly zavedeny normy zabývající se podmínkami bezpečného plnění automobilových nádrží v závislosti na okolních podmínkách a konkrétních režimech jeho čerpání.

Podmínkami bezpečného plnění vodíkových vozidel se zabývají normy řady SAE J2601 [4, 6], které jsou vydávány ve variantách pro různé velikosti nádrží velikostně od motorek po nákladní automobily a autobusy. Z hlediska podmínek bezpečného plnění vymezují normy čtyři kritéria, které je nutné splnit. Jedná se o nepřekročení maximální teploty 85 °C v celém průběhu plnění, nepřekročení maximálního tlaku, který odpovídá 1,25 násobku nominálního tlaku nádrže (pro nejobvyklejší varianty nádrží 87,5 MPa či 43,75 MPa) a nepřekročení maximální kapacity nádrže, tzv. SOC („State of Charge“ < 100 %). Poslední podmínkou je poté nepřekročení maximálního hmotnostního průtoku v průběhu celého plnění, v závislosti na typu nádrže tedy musí platit, že maximální hmotnostní průtok pro uvedené nejobvyklejší varianty nádrží je < 60 g / s nebo < 120 g / s.

Základní myšlenka realizovaného matematicko-fyzikálního modelu vlastní implementace je postavena na bázi tzv. 0D a 1D prvků numerického modelování, které jsou realizovány ve čtyřech základních fyzikálních modulech:

- **Tepelná bilance čerpání plynu mezi jednotlivými geometriemi.** Tepelná bilance přečerpávaného plynu mezi geometriemi bilancuje dvě základní veličiny, konkrétně hmotnost a energii.
- **Stavový model vodíku definující jeho proměnné fyzikální vlastnosti v závislosti na teplotě a tlaku plynu.** Stavový model je pojem oblasti termodynamiky označující rovnice či jejich množinu, které definují vztahy mezi jednotlivými veličinami charakterizujícími stav daného termodynamického systému.
- **Odvod tepla do okolí.** Z formulovaného zákona zachování energie a stavového popisu plyne, že načerpáním určitého množství plynu do tlakové nádoby vzroste energie tohoto plynu a úměrně tomu také jeho teplota, což s sebou může při specifických podmínkách

čerpání nést riziko porušení podmínek bezpečného plnění. Z tohoto hlediska hraje klíčovou roli teplo odvedené ze systému stěnou tlakové nádoby.

- **Lokální jevy vznikající ve specifických částech geometrie.** Významným fyzikálním fenoménem zahrnutým ve výpočtech tepelné bilance je lokální děj označovaný jako Joule-Thompsonův jev. Jedná se o fyzikální děj, při němž se v průběhu adiabatické expanze tekutiny skrze přepážku mezi oblastmi s rozdílnou hodnotou tlaku mění jeho teplota.

Vytvořený matematicko-fyzikální model bilancuje fyzikální veličiny nad čtyřmi základními geometriemi:

- plnicí stanicí,
- přívodními hadicemi plnicí stanice,
- přívodními hadicemi automobilu,
- automobilovou nádrží.

Plnicí stanice je definována jako množina samostatných svazků tlakových lahví, mezi nimiž se může v průběhu čerpání libovolně přepínat a nádrž je dle specifikace automobilu modelována jako jedna či větší množství souběžně plněných tlakových lahví.

### Závěr

V příspěvku jsou uvedeny základní parametry prototypu mobilní stanice a je prezentována výpočetní podpora pro stanovení optimálních parametrů plnění. Tento prototyp byl vyvinut z důvodu, že vystavění sítě stacionárních plnicích vodíkových stanic je časově náročné, finančně nákladné a vyplatí se pouze v určitých lokalitách. Mobilní plnicí vodíková stanice je významným doplňkem stacionárních stanic a umožní urychlení rozvoje nízkoemisní mobility.

### Poděkování

Prototyp mobilní vodíkové plnicí stanice byl vyvinut s podporou projektu Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky EG20\_321/0025011 APLIKACE – VÝZVA VIII „Mobilní vodíková plnicí stanice“.

### Literatura

- [1] *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility* [online]. MPO ČR, 2020 [cit. 2023-09-13]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>
- [2] POLACH, Pavel, KULAS, Jan a LEXA, Josef. Vývoj mobilní plnicí vodíkové stanice. In: *17. konference Životnost komponent energetických zařízení*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2022, str. 41-45. ISBN 978-80-261-1109-2.
- [3] SVATÝ, Jakub a MERVART, Petr. *Mobilní vodíková plnička*. Mladá Boleslav, DEVINN s.r.o., červenec 2023, technická zpráva, AH02802.
- [4] SAE J2601. *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*. SAE International, 2020, Standard.
- [5] BĚLOHOUBEK, Marek, LAZAR, Jan, POLCAR, Petr a POLACH, Pavel. *Vývoj modelu pro simulace plnění vodíkových aplikací*. Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., květen 2023, výzkumná zpráva, VZU-VZ-46/23/009.
- [6] WILL, James. *An Introduction to SAE Hydrogen Fueling Standardization*. U.S. Department of Energy [online]. 2014 [cit. 2023-09-13]. Available on: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/fcto\\_webinarslides\\_intro\\_sae\\_h2\\_fueling\\_standardization\\_091114.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/fcto_webinarslides_intro_sae_h2_fueling_standardization_091114.pdf)

## KOMPLEXNÍ SLUŽBA PRO TURBÍNU A GENERÁTOR

### COMPREHENSIVE SERVICE FOR TURBINE AND GENERATOR

Zdeněk Kubín, David Aišman, Vít Horáček a Jan Šipla

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

#### Abstrakt

Tento příspěvek se zaměřuje na vývoj a implementaci komplexní služby pro turbínu a generátor, která je klíčovým prvkem moderního energetického sektoru. Cílem je dosažení optimálního výkonu, spolehlivosti a účinnosti za účelem zlepšení energetické udržitelnosti a konkurenceschopnosti.

První fáze spočívá v důkladné diagnostice stavu turbíny a generátoru, včetně analýzy mechanického opotřebení, tepelného zatížení a elektrického výkonu. Na základě těchto dat je vytvořen individuální plán údržby a oprav, který zahrnuje preventivní opatření a opravy prováděné během plánovaných odstávek. Například vizuální kontroly, rozbory mazacích olejů, diagnostika provozních veličin atd.

Další klíčovou součástí služby je implementace pokročilých monitorovacích systémů, včetně senzorů sledujících teploty, tlaky, vibrace a elektrické parametry. Tato data jsou sbírána v reálném čase a analyzována pomocí algoritmů umělé inteligence pro detekci potenciálních problémů a predikci budoucího vývoje.

Jedním z hlavních cílů a inovativních prvků této služby je využití technologií rozšířené reality (AR) pro podporu vzdálených oprav a údržby. Kvalifikovaní technici jsou schopni získat odborné rady a pokyny od expertů přímo na místě dění, což výrazně zkracuje časové náklady na opravy. Díky prediktivní analýze se daří významně snížit riziko neočekávaných poruch a prodloužit životnost zařízení.

Tato komplexní služba reprezentuje klíčový krok směrem k energetické udržitelnosti a konkurenceschopnosti v moderním energetickém sektoru. Je připravena nabídnout podnikům a energetickým provozovatelům efektivní nástroj pro optimalizaci provozu turbín a generátorů, a tím i celkového energetického výkonu. Uvedme několik názorných příkladů.

#### Abstract

This paper focuses on the development and implementation of end-to-end service for the turbine and generator, which is a key element of the modern energy sector. The aim is to achieve optimal performance, reliability and efficiency in order to improve energy sustainability and competitiveness.

The first phase consists of a thorough diagnosis of the condition of the turbine and generator, including analysis of mechanical wear, thermal load and electrical output. Based on this data, an individual maintenance and repair plan is created, which includes preventive measures and repairs carried out during planned shutdowns. For example, visual inspections, analyzes of lubricating oils, diagnostics of operating quantities, etc.

Another key part of the service is the implementation of advanced monitoring systems, including sensors monitoring temperatures, pressures, vibrations and electrical parameters. This data is collected in real time and analyzed using artificial intelligence algorithms to detect potential problems and predict future developments.

One of the main goals and innovative elements of this service is the use of augmented reality (AR) technologies to support remote repairs and maintenance. Qualified technicians are able to get professional advice and instructions from experts right at the scene, which significantly



reduces the time costs of repairs. Thanks to predictive analysis, it is possible to significantly reduce the risk of unexpected failures and extend the life of the equipment.

This comprehensive service represents a key step towards energy sustainability and competitiveness in the modern energy sector. It is ready to offer businesses and energy operators an effective tool for optimizing the operation of turbines and generators, and thus the overall energy performance. Let's give some illustrative examples.

#### **Analýza olejů a provoz ložisek**

Dalším klíčovým prvkem naší komplexní služby je podrobná analýza olejů a mechanického stavu ložisek. Prostřednictvím pravidelných vzorků oleje a monitorování stavu ložisek jsme schopni identifikovat potenciální opotřebení, kontaminaci nebo přítomnost nečistot. Tato preventivní opatření umožňují předcházet poruchám, optimalizovat výkon a prodloužit životnost ložisek a tím i celého turbosoustrojí.

#### **Inspekce kondenzátoru**

V rámci naší služby je prováděna důkladná inspekce kondenzátoru s důrazem na čistotu a tloušťky stěn titanových trubek. Tyto faktory jsou klíčové pro udržení efektivity kondenzátoru a minimalizaci tepelných ztrát. Naše vyspělé techniky a zařízení umožňují provedení neinvazivních měření, která poskytují přesné informace o stavu kondenzátoru a umožňují plánování preventivní údržby.

#### **Inspekce chladících věží**

Chladicí věže jsou nezbytnou součástí energetických systémů a jejich účinnost má přímý vliv na celkovou energetickou účinnost. Naše služby zahrnují pravidelné inspekce chladících věží s důrazem na detekci potenciálních problémů, jako jsou koroze, sedimentace a úniky. S použitím moderních technologií jsme schopni poskytnout doporučení pro údržbu a opravy, které vedou ke zlepšení účinnosti chladících věží a snížení provozních nákladů.

#### **Hodnocení stavu generátorů**

Komplexní služba, kterou poskytujeme, zahrnuje hloubkové hodnocení stavu generátorů s důrazem na jak mechanické, tak elektrické aspekty. V oblasti mechanického stavu se zaměřujeme na důkladnou inspekci všech klíčových komponent generátoru. To zahrnuje ložiska, rotory, klínové pásy, izolační materiály a další části, které mají vliv na spolehlivý provoz generátoru. V průběhu této analýzy se monitorují fyzikální parametry, jako jsou teplota, vibrace a tlak, aby bylo možné identifikovat případné anomálie nebo příznaky opotřebení.

Pokud jde o elektrické veličiny, provádíme komplexní měření a testování všech klíčových parametrů generátoru. To zahrnuje napětí, proud, frekvenci a další elektrické charakteristiky, které ovlivňují výkon a účinnost generátoru. Naše techniky jsou vybaveny pokročilými zařízeními pro měření a diagnostiku, která umožňují přesné a spolehlivé hodnocení elektrického stavu generátoru.

Kromě toho provádíme také komplexní analýzu dat z předchozích provozních cyklů generátoru, abychom identifikovali dlouhodobé trendy a predikovali budoucí vývoj. To nám umožňuje doporučit optimální plán údržby a oprav, který maximalizuje spolehlivost a výkon generátoru.

Celkově lze konstatovat, že naše hodnocení stavu generátorů spojuje detailní mechanickou analýzu s komplexním měřením elektrických parametrů, což umožňuje poskytnout klientům kompletní přehled o stavu jejich zařízení. Tato integrace dat nám umožňuje identifikovat potenciální problémy včas a navrhnout účinná opatření pro optimalizaci výkonu a prodloužení životnosti generátorů.



**Celkové shrnutí komplexní služby**

Naše komplexní služba pro turbínu a generátor představuje integrovaný přístup k optimalizaci výkonu a spolehlivosti energetických zařízení. Zahrnuje pravidelnou diagnostiku mechanického a elektrického stavu turbín a generátorů, což umožňuje identifikovat potenciální problémy včas. Analýza olejů a provozu ložisek, analýza vibrací, společně s inspekcemi kondenzátoru a chladících věží doplňuje tento proces, poskytujíc klientům komplexní pohled na stav celé točivé osy.

Díky pokročilým technologiím a algoritmům umělé inteligence můžeme predikovat budoucí vývoj a navrhnout preventivní opatření, čímž minimalizujeme riziko neočekávaných poruch. Naše hodnocení stavu generátorů integruje důkladnou mechanickou analýzu s komplexním měřením elektrických parametrů, což umožňuje poskytnout klientům kompletní přehled o stavu jejich zařízení.

Celkově naše komplexní služba přináší zvýšenou energetickou účinnost, snížení provozních nákladů a prodloužení životnosti turbín a generátorů. Je to klíčový krok směrem k udržitelnému a konkurenceschopnému provozu v moderním energetickém sektoru.



## VIZUÁLNÍ INSPEKCE VNITŘNÍCH ČÁSTÍ ENERGETICKÝCH BLOKŮ LETECKÝM INSPEKČNÍM ZAŘÍZENÍM

### VISUAL INSPECTION OF INTERNAL PARTS OF ENERGY BLOCKS BY AERIAL INSPECTION EQUIPMENT

Filip Schmidt

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

#### **Abstrakt**

Tento příspěvek se zaměřuje na vývoj a optimalizaci metod vizuální inspekce vnitřních částí energetických bloků za použití leteckého inspekčního zařízení. Cílem studie je objasnit aspekty letecké inspekční činnosti, zlepšit účinnost a spolehlivost inspekčních postupů, které jsou klíčové pro udržování a zvyšování spolehlivosti energetických bloků v energetice.

Činnost využívá pokročilé technologie v oblasti bezpilotních letounů a obrazového zpracování k dosažení vysokého stupně detailnosti při vizuální inspekci. Proces je založen na sběru vysoce kvalitních obrazových dat, která jsou následně analyzována jednak experty v oblasti NDT, tak pomocí algoritmů zpracování obrazu a umělé inteligence.

Výsledkem této studie jsou optimalizované postupy pro vizuální inspekci vnitřních částí energetických bloků, které umožňují rychlejší a preciznější detekci potenciálních problémů a opotřebení. To vede ke snížení nákladů na údržbu a zvyšuje celkovou spolehlivost energetických systémů.

Tato práce přináší inovativní přístup k inspekci energetických bloků a otevírá dveře k dalším možnostem v oblasti využití leteckých inspekčních zařízení pro údržbu a monitorování technických zařízení ve vzdušném prostoru.

#### **Abstract**

This contribution focuses on the development and optimization of visual inspection methods for the internal parts of power blocks using aerial inspection equipment. The aim of the study is to clarify aspects of aerial inspection activity, to improve the efficiency and reliability of inspection procedures, which are key to maintaining and increasing the reliability of power blocks in the energy industry.

The operation uses advanced technologies in the field of unmanned aircraft and image processing to achieve a high degree of detail in visual inspection. The process is based on the collection of high-quality image data, which is subsequently analyzed both by experts in the field of NDT and by means of image processing algorithms and artificial intelligence.

The result of this study is optimized procedures for visual inspection of the internal parts of power blocks, which allow faster and more accurate detection of potential problems and wear. This leads to reduced maintenance costs and increases the overall reliability of power systems.

This work brings an innovative approach to the inspection of energy blocks and opens the door to other possibilities in the field of using aerial inspection equipment for the maintenance and monitoring of technical equipment in airspace.

#### **Oblasti použití**

Tato technologie vizuální inspekce prostřednictvím leteckých inspekčních zařízení má široké uplatnění v různých sektorech energetického průmyslu. Jednou z hlavních oblastí je inspekce elektrárenských kotlů, kde je klíčové monitorování stavu vyzdívek, integrity

jednotlivých částí výparníku a průchodnosti trysek. Díky schopnosti leteckých zařízení dosáhnout obtížně přístupných oblastí umožňuje tato technologie důkladné posouzení stavu kotle, což vede ke snížení rizika havárie a zvyšuje efektivitu provozu.

Dalším klíčovým využitím je kontrola integrity chladicích věží, která dokáže odhalit nejrůznější skupiny defektů s jejich degradačním mechanismem. U chladicích věží je žádoucí provádět pravidelný monitoring stavu vnitřního i vnějšího povrchu opláštění, nosný systém vestavby a stav systému rozvodu vody. Letecké inspekční zařízení umožňuje rychlý a komplexní přístup k věžím, což vede k včasné identifikaci a opravě problémů, a tím k optimalizaci chladicího procesu a snížení energetických nákladů. Díky robotické inspekci odpadají značná rizika spojená s touto činností běžně prováděnou lidmi, jako jsou práce ve výškách, nebo práce kde hrozí utonutí.

Kromě toho se tato technologie významně uplatňuje i při inspekci závěsů potrubí. Díky schopnosti leteckých zařízení pohybovat se ve výškách a dosáhnout obtížně přístupných míst umožňuje tato metoda důkladnou kontrolu spojů, upevnění a celkového stavu potrubního systému. To vede k prevenci úniků, minimalizaci havárií a zajištění bezpečného provozu energetických zařízení.

### **Využití mračna bodů získaných pomocí LiDAR technologie**

Použití LiDAR technologie ve spojení s dronem přináší mimořádné výhody při vizuální inspekci vnitřních částí energetických bloků. Robot nesoucí LiDAR zařízení generuje mračno bodů, které umožňuje vytvoření 3D modelu sledovaného objektu. Tento model poskytuje mnohostranný pohled na stav vnitřních struktur a umožňuje provádět analýzy s vysokou přesností.

Jednou z klíčových výhod využití mračna bodů je navigace v něm, a tedy možnost opakovatelného letu. Díky tomu je možné pravidelně monitorovat změny a vývoj stavu vnitřních částí energetických bloků v čase. Tato opakovatelnost umožňuje včasné odhalení potenciálních problémů a jejich rychlou korekci, čímž se zvyšuje celková spolehlivost zařízení. S tímto prvkem je spojena schopnost lokalizace snímků vzhledem k mračnu. Inspektor je tedy schopen daný defekt přesně v technologii lokalizovat.

### **Shrnutí**

Tento výzkum se zaměřuje na využití pokročilé LiDAR technologie ve spojení s bezpilotním leteckým prostředkem pro vizuální inspekci vnitřních částí energetických bloků. Díky generování hustého mračna bodů a vytvoření detailního 3D modelu umožňuje tato technologie precizní monitorování stavu klíčových komponent energetických zařízení.

Opakovatelnost letu je klíčovou výhodou tohoto přístupu, což umožňuje pravidelné sledování změn a včasné detekce potenciálních problémů. To vede k výraznému snížení rizika havárií a zvyšuje celkovou spolehlivost energetických bloků.

Při provádění vizuální inspekce vnitřních částí energetických bloků pomocí leteckých inspekčních zařízení je důležité brát v úvahu aspekty vnitřního létání. Existuje riziko uvíznutí zařízení v obtížně přístupných částech, a je třeba pečlivě plánovat letové trasy a výběr inspekčních bodů.

Kromě toho je nezbytné brát v úvahu rizika spojená s technickým stavem samotného dronu. Závady na motoru, nefunkční baterie nebo jiné technické problémy mohou mít vliv na bezpečnost a úspěšnost inspekce. Proto je důležité provádět pravidelné technické kontroly a údržbu inspekčního zařízení.

Celkově lze říci, že využití LiDAR technologie a leteckého prostředku pro vizuální inspekci vnitřních částí energetických bloků přináší revoluční přístup k údržbě a monitorování energetických zařízení. Správné plánování a důkladná kontrola technického stavu jsou klíčové pro úspěšné a bezpečné provádění těchto inspekcí.

## MANIPULÁTORY JAKO PROSTŘEDEK PRO ZVÝŠENÍ KVALITY PROVOZNÍCH KONTROL

### MANIPULATORS AS A MEANS OF INCREASING THE QUALITY OF IN-SERVICE INSPECTIONS

Pavel Mareš, Tomáš Trojan a Jiří Netušil

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

#### Abstrakt

Mnoho provozních kontrol prováděných zejména ultrazvukovou metodou, bylo do nedávné doby realizováno ručně nebo poloautomatizovaně s využitím enkodérů. Tyto typy kontroly většinou postrádají záznam dat a jsou závislé na zkušenostech operátora, který tyto kontroly provádí. Z těchto důvodů je v posledních letech jednou z důležitých aktivit realizovaných v rámci Centra výzkumu Řež vývoj a výroba manipulátorů pro nedestruktivní zkoušení. V tomto článku budou blíže popsány manipulátory sloužící pro ultrazvukové zkoušení nátrubků havarijních, regulačních a kompenzačních orgánů, nátrubků systému havarijního napájení parogenerátorů ošetřených opravou weld overaly (WOL), kontrolu závěsů nízkotlakých lopatek a další. Vyvinuté manipulátory umožní zpřesnění a zlepšení opakovatelnosti kontrol, které byly dosud prováděny ručně (přesnější vedení sond apod.) nebo nebyly prováděny vůbec z důvodu nepřístupnosti.

#### Abstract

Many in-service inspections, mainly carried out by the ultrasonic method, were until recently carried out manually or semi-automated with the use of encoders. These types of inspections usually lack data recording and are dependent on the experience of the operator performing these inspections. For these reasons, in recent years one of the important activities carried out within the Research Centre Rez has been the development and production of manipulators for non-destructive testing. This article will describe in more detail the manipulators used for ultrasonic testing of the reactor head nozzles, nozzles of the emergency power supply system of steam generators treated with weld overlay, inspection of low-pressure blade dovetails and others. The developed manipulators will make it possible to refine and improve the repeatability of inspections that were previously carried out manually (more precise guidance of probes, etc.) or were not carried out at all due to inaccessibility.

#### Úvod

V dnešní době je přechod na automatizované zkoušení více a více žádané, jak z pohledu finančních úspor, tak i z důvodu zvýšení spolehlivosti provádění kontrol a jejich případného rozšíření o místa, kde je fyzicky personálem nebylo možné provádět. Přechodem na mechanizované zkoušení se rozumí nasazení manipulátorů, které vede především ke snížení nákladů a zvýšení bezpečnosti provozu. Náklady lze snížit zkrácením doby kontrol a tím i doby odstávek, případně některé NDT provádět s menší demontáží nebo i za provozu. S manipulátorem lze také snížit pracovní sílu pro NDT. Zvýšení bezpečnosti je způsobeno především možností provádět kontrolu, kterou nelze provádět ručně kvůli náročným podmínkám, omezenému prostoru, výšce atd., nebo by pracovníci byli vystaveni vysokému bezpečnostnímu riziku.

#### Manipulátor na kontrolu nátrubků HRK

Zkoušení nátrubků havarijních, regulačních a kompenzačních orgánů, které se nacházejí na víku tlakové nádoby reaktoru VVER 440, je nutné podrobit pravidelným provozním kontrolám zejména z důvodu rizikového místa v jejich horní části, kde bylo z provozních zkušeností zjištěno, že může docházet ke vzniku trhlin. Vzhledem ke špatné přístupnosti, zejména sedmi nátrubků, které se nacházejí ve středové části, bylo nutné vyvinout manipulační zařízení. Díky

tomuto zařízení jsou proveditelné NDT kontroly všech nátrubků, a to především díky zavážecímu táhlu (podavači), které umožňuje rotačně nastavitelnou polohovatelnost samotného manipulátoru, čímž umožní umístění manipulátoru i na prostřední nátrubky. Rotační pohyb samotného manipulátoru následně umožní ultrazvukové sondě provést kontrolu kritického místa na rozhraní návaru a základního materiálu po celém obvodu nátrubku.



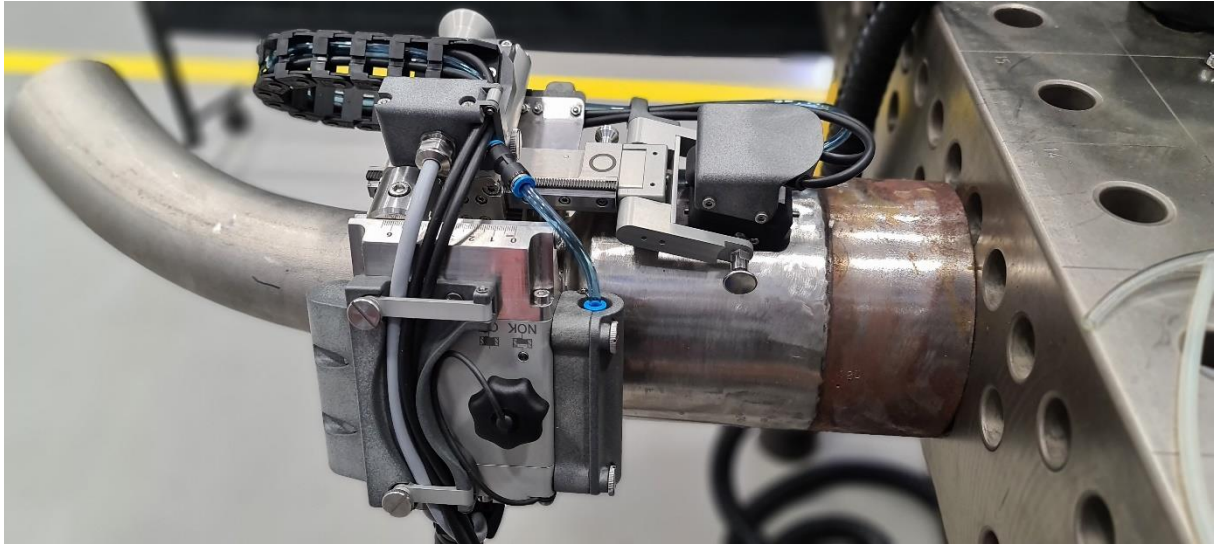
Obr. 1: Manipulátor na kontrolu nátrubků HRK

### Manipulátor na kontrolu nátrubku ošetřeného metodou WOL

Na nátrubcích systému superhavarijního napájení parogenerátoru na elektrárně Dukovany byla v minulosti provedena oprava metodou weld overaly, která spočívá v navaření dodatečného materiálu na vnějším povrchu. Navařením svarového kovu dojde vlivem efektu smrštění vycházejícímu z oblasti návaru k redistribuci napětí v opravovaném svarovém spoji a v oblasti čela defektu vznikne tlakové napětí. Zároveň dochází k vytvoření tlakového napětí, případně mírně tahového, v oblasti kořene svaru. Tímto způsobem je zamezeno dalšímu šíření defektu v opravovaném svarovém spoji. [1] Po realizaci tohoto návaru je nutné provést výrobní kontrolu ultrazvukovou technikou phased array, která spočívá v proskenování 100 % objemu návaru s pozicí sondy směřující do obvodového i axiálního směru. Periodické provozní kontroly se posléze provádí v rozsahu – oblast svarového spoje + tepelně ovlivněná zóna (13 mm) a do hloubky 25% horní tloušťky základního materiálu původního nátrubku. Do nedávné doby byly tyto kontroly prováděny ručně bez pravidelného záznamu dat. To mělo za následek komplikované trendování v případě detekce indikací a v neposlední řadě také zvýšení radiační zátěže personálu. Z tohoto důvodu byl vyvinut manipulátor, který díky své konstrukci umožní jednoduché uchycení na potrubí v blízkosti nátrubku a dále pohyb ve dvou osách, obvodové díky samotnému vozíku a axiální pomocí výsuvného ramínka. Díky tomu je možný pohyb sondy v libovolně definovaném rastru. Požadavek pro tyto kontroly je rastr 6x6 mm.

Tento manipulátor byl rovněž navržen jako univerzální, tzn. při změně průměru vodícího kruhu a případně ramínka manipulátoru bude možné manipulátor nasadit na potrubí o jiném průměru.

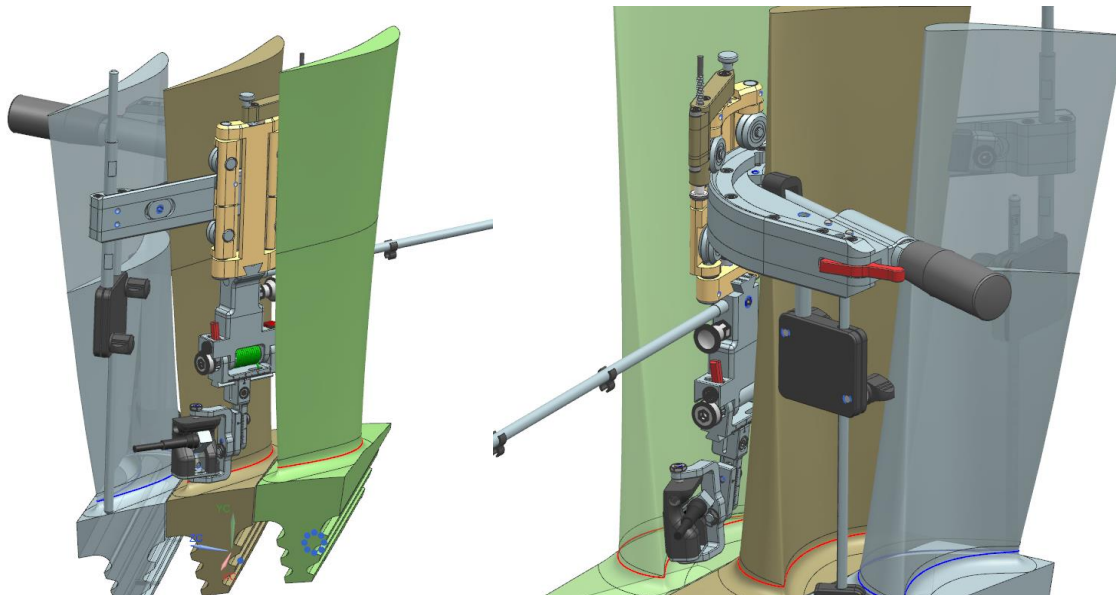




Obr. 2: Testování manipulátoru WOL na zkušebním tělese

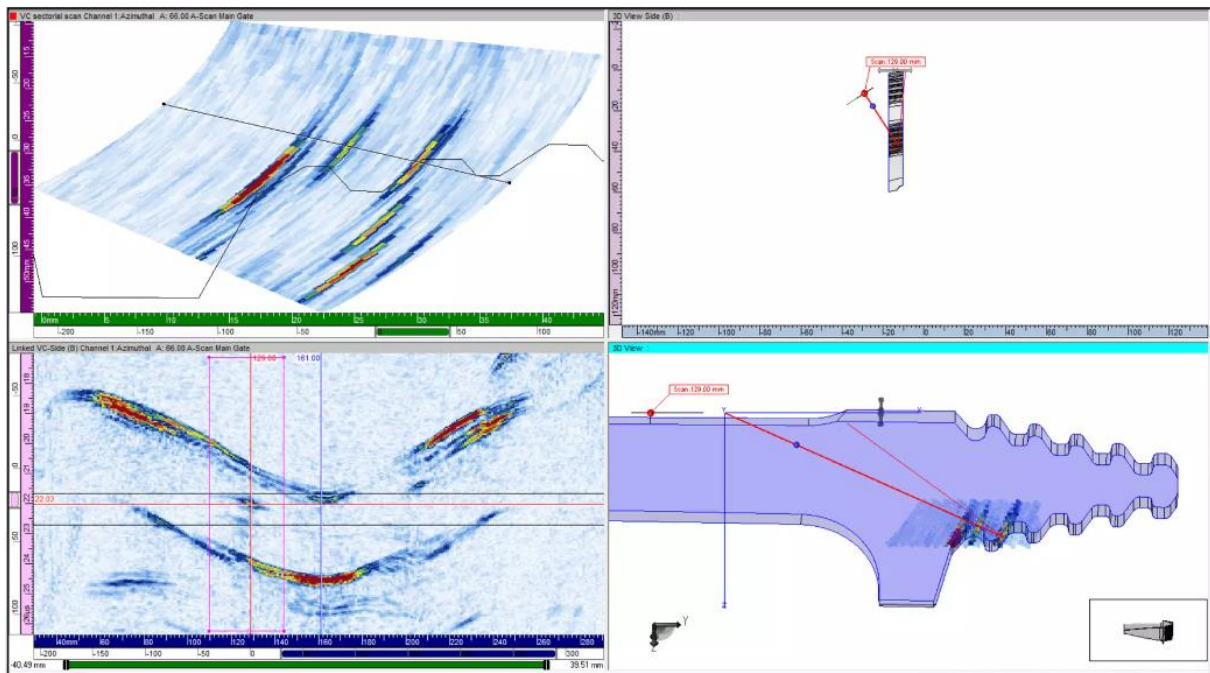
### Manipulátor na kontrolu lopatek nízkotlakých turbín

Zámky lopatek nízkotlakých turbín, zejména těch se „stromečkovou“ konfigurací, mohou během provozu vykazovat výskyt trhlin. Z tohoto důvodu je důležité provádět ultrazvukovou kontrolu technikou phased array v co největším možném rozsahu. Vzhledem ke složité geometrii lopatek je tato kontrola poměrně komplikovaná, zejména pokud je požadován i záznam naměřených dat. Z tohoto důvodu byl vyvinut manipulátor, který umožní zkoušení zámkového závěsu z obou stran lopatek (viz obr. 3) pro tři různé rozměry lopatek. Při znalosti přesné polohy sondy a 3D modelu lopatky bude možné ultrazvuková data interpolovat přímo do tohoto modelu a tím jasně odlišit geometrické indikace od vadových.



Obr. 3: Model manipulátoru pro kontrolu lopatek





Obr. 4: Vizualizace ultrazvukových dat v 3D modelu [2]

## Závěr

Výše popsané manipulátory demonstrují přínosy mechanizovaných kontrol z různých pohledů. Při správné volbě a používání mohou manipulátory výrazně snížit náklady a zvýšit bezpečnost, což může být dalším krokem ke konceptu „průmyslu 4.0“ a navíc je znakem moderní společnosti využívající současné technologie a trendy.

## Poděkování

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

## Literatura

- [1] PALÁN, Marek, MLYNÁŘ, Pavel a DUCHÁČEK, Petr. Opravná technologie Weld Overlay a její zavedení pro opravy heterogenních svarových spojů nátrubků superhavarijního napájení parních generátorů JE typu VVER 440 MW. *All for power*, 2018, vol. 2018/4, ISSN 1802-8535.
- [2] Prezentace firmy Zetec – Turbine Blade Inspection.

# MONITOROVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ VE STATOROVÉM VINUTÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ

## PARTIAL DISCHARGE MONITORING OF SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR WINDING

Milan Kasárník, Oto Mareček a Miloš Kaška

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

### Abstrakt

Výskyt částečných výbojů indikuje postupnou degradaci izolačního systému statorového vinutí. Úroveň částečných výbojů souvisí s kvalitou izolace, uložením v drážkách a kvalitou 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. Účelem 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 the stator winding insulation system. The level of partial discharges depends on the insulation quality, the quality of the location in the grooves, and the quality of the semi-conductive layer of the insulation. As the degradation and aging process of the insulation system progresses the level of partial discharges increases. The discharges may create conditions for the emergence of the 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 v průběhu chodu generátoru. Naměřená data jsou prostřednictvím datové komunikace 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]

### Teorie částečných výbojů generátorů

Částečné výboje jsou obecně elektrické výboje, které vznikají přechodnou ionizací plynu v dutinkových nehomogenitách izolačních systémů, jakmile elektrické namáhání překročí kritickou hodnotu zápalného napětí v příslušné nehomogenitě izolačního systému. 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 [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, 4].

Příčinou vzniku nehomogenit izolace může být řada degračních poruchových mechanismů, mezi něž především patří tepelná degradace izolace, časté změny zátěže stroje, chybná impregnace stroje, volné vinutí a nedostatečné odstupy vinutí. Pro analytické hodnocení částečných výbojů je však důležité hledisko porovnatelných provozních technologických podmínek, protože jen při podobných provozních podmínkách 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 předávány 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 2022**

U obou generátorů 1 a 2 byla v období let 2015 až 2022 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, resp. tabulce 2. Pro celkové zhodnocení stavu izolačního systému statoru generátorů se využívá hodnot  $Q_m$  [mV].

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 hodnocení 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 četností těchto impulsů ty-

pické aktivitě částečných výbojů uvnitř izolačního systému s podílem delaminace mezi vodičem a izolací (vnitřní výboje jsou vytvářeny v podélně protažených kapsách, které jsou uzavřeny mezi hlavní izolací a vysokonapěťovým vodičem), viz obr. 3. Z uvedeného vyplývá, že izolační systém generátoru 1 je v horším stavu, avšak stabilizovaný, protože ve sledovaném období nebyly zjištěny výraznější rostoucí trendy [1-3, 5-9].

U generátoru 2 jsou hodnoty  $Q_m$  hodnoceny jako zanedbatelné, protože jen 25 % sledovaných generátorů těmito analyzátory 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 [1-3, 5-9].

### **Mimořádné vyhodnocení měření částečných výbojů generátoru 2 v roce 2023**

U generátoru 2 byla v červenci 2023 sledována vyšší výbojová činnost zejména ve fázi W2 ve satorové drážce 13. Následně došlo také k vygenerování varovného hlášení při překročení nastavené varovné meze.

Podrobnou analýzou [10] bylo zjištěno, že trend nárůstu částečných výbojů není čistě rostoucí, ale naopak velmi kolísavý (viz obr. 4), z čehož vyplývá, že rozvoj poruchy izolačního systému je jen v počáteční fázi vývoje. Hodnoty  $Q_m$  ve fázi W2 v drážce č. 13 generátoru 2 jsou hodnoceny jako „průměrné“, protože 90% sledovaných generátorů systému IRIS POWER vykazují nižší hodnoty. Hodnoty  $Q_m$  v drážkách fází U a V jsou hodnoceny jako „malé“, protože jen 50% sledovaných generátorů systému IRIS POWER vykazují nižší hodnoty. Pro čela vinutí všech fází platí hodnocení „malé“. K rostoucím trendům hodnot  $NQN$  a  $Q_m$  došlo za stabilního zatížení generátoru cca 1063 – 1109 MW, provozního tlaku vodíku 491 – 511 kPa, ale při zvýšené teplotě chladicí vody 60 – 64 °C (obvykle do 60 °C). Provozní režim generátoru 2 byl ve srovnání s generátorem 1 převážně v podbuzeném stavu.

Protože trend parametrů není čistě rostoucí, ale naopak velmi kolísavý (viz obr. 4), nelze pomocí analýzy rozložení hustoty impulzů částečných výbojů jednoznačně určit charakter rozvíjející se poruchy (viz obr. 5). Vzhledem k tomu, že se v záznamech dat objevují většinou jen záporné impulzy lze se domnívat, že se jedná pravděpodobně o vnitřní výboje s delaminací mezi vodičem a izolací (vnitřní výboje jsou vytvářeny v podélně protažených kapsách, které jsou uzavřeny mezi hlavní izolací a vysokonapěťovým vodičem).

Pravděpodobnou příčinou zhoršení stavu izolačního systému satorového vinutí generátoru 2 je dlouhodobý provoz v podbuzeném stavu a současně zvýšení teploty chladicí vody satorového vinutí. Proto pro udržitelný dlouhodobý provoz generátoru 2 bylo doporučeno přijmout taková provozně technická opatření, která umožní provoz generátoru s nižším podbuzením a zároveň zajistí snížení teploty chladicí vody satorového vinutí i v období vyšších klimatických teplot venkovního prostředí.

Pro účel konzultace byly záznamy dat poskytnuty výrobcí analyzátoru částečných výbojů. Výrobce analyzátoru potvrdil správnost všech analýz a doporučil generátor 2 k dalšímu provozu. Zároveň výrobce analyzátoru souhlasil s doporučením přenastavení velmi přísných varovných a alarmových úrovní částečných výbojů na vyšší hodnoty.

### **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 satorového 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.

Všechny uvedené výhody on-line monitoringu částečných výbojů je možné dokladovat na mimořádném vyhodnocení generátoru 2. Mimořádné hodnocení bylo provedeno na základě



včasné varovné signalizace. Pro rychlou kontrolu aktuálních záznamů dat bylo využito aktivních obrazovek WEB prostředí NEMES stejně jako rychlé zjištění trendů částečných výbojů. Po rychlé operativní diagnostice bylo přistoupeno k detailní podrobné časové analýze záznamů parametrů v systému NEMES a podrobné analýze záznamů pomocí aplikace PDView3.

Aplikovaný on-line monitoring tedy umožňuje rychlé operativní analýzy aktuálního stavu generátoru, ale také podrobné detailnější analýzy vhodné pro dlouhodobé sledování trendů hodnocených parametrů.

## Literatura

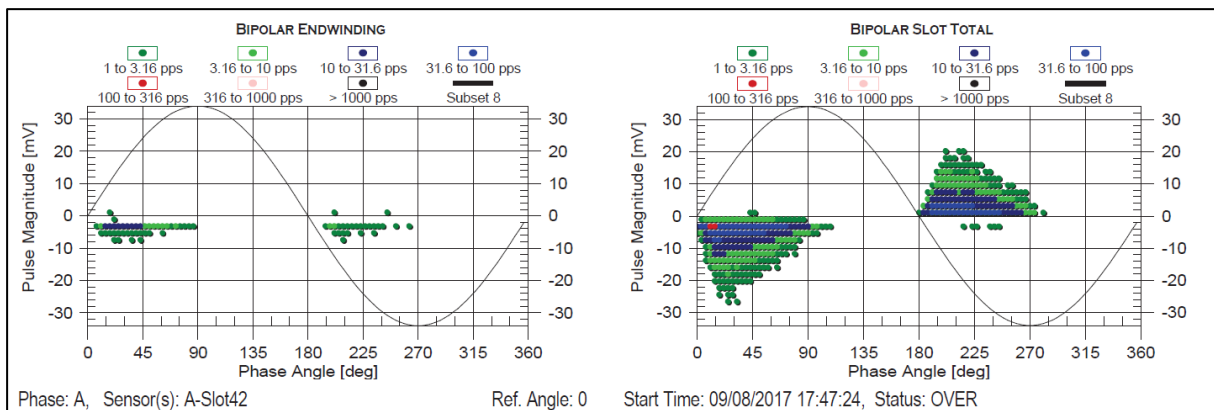
- [1] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1000 MW na ETE (od uvedení do provozu za kampaň 2014 – 2015)*. Třebíč, TES s.r.o., 2015, zpráva.
- [2] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2015 – 2016)*. Třebíč, TES s.r.o., 2016, zpráva.
- [3] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2016 – 2017)*. Třebíč, TES s.r.o., 2017, zpráva.
- [4] KASÁRNÍK, M. *Metodika pro výběr, zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE*. Třebíč, TES s.r.o., 2017, zpráva.
- [5] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2017 – 2018)*. Třebíč, TES s.r.o., 2018, zpráva.
- [6] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2018 – 2019)*. Třebíč, TES s.r.o., 2019, zpráva.
- [7] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2019 – 2020)*. Třebíč, TES s.r.o., 2020, zpráva.
- [8] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2020 – 2021)*. Třebíč, TES s.r.o., 2021, zpráva.
- [9] KASÁRNÍK, M. *Zpracování a vyhodnocení dat z diagnostiky částečných výbojů ve statoru turbogenerátorů 1125 MW na ETE (za kampaň 2021 – 2022)*. Třebíč, TES s.r.o., 2022, zpráva.
- [10] KASÁRNÍK, M. *Mimořádná diagnostika částečných výbojů ve statoru turbogenerátoru na ETE*. Třebíč, TES s.r.o., 2023, zpráva.

Automatický rozsah												Částečné výboje generátoru 1SP01D001 - automaticky volené citlivosti (měřicí modul INEMES-CVTG_A.1)			
Fáze	Senzor	Drážka	Citlivost [mV]	EW NQN+	EW NQN-	EW Qm+	EW Qm-	Slot NQN+	Slot NQN-	Slot Qm+	Slot Qm-	Stav měření	Čas měření [UTC+1h]		
U	U1	42	20-340	0	0	0	0	23.52	35.99	26	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 1SP01D001 (zdroj parametrů: systém INEMES-ASRU_A)															
P [MW]				Q [MVar]				UG [kV]				t [°C]		pH [kPa]	
1071				31				23.43				33		510	
Provozní parametry diagnostického přístroje															
t [°C]												30.08.2018 13:28:30			
54.8															
Alarmové PD meze Qm v TurboGuard přístroji															
nízká				vysoká				velmi vysoká							
7 mV				18 mV				29 mV							

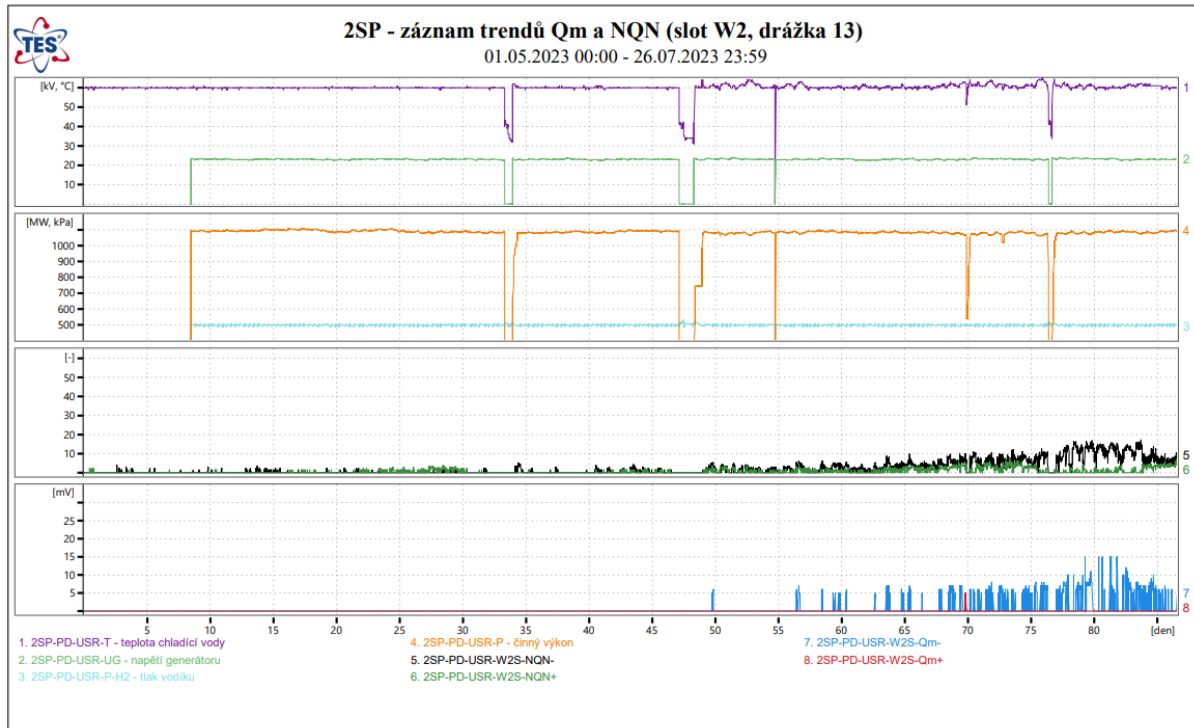
Obr. 1: WEB rozhraní NEMES – úrovně částečných výbojů



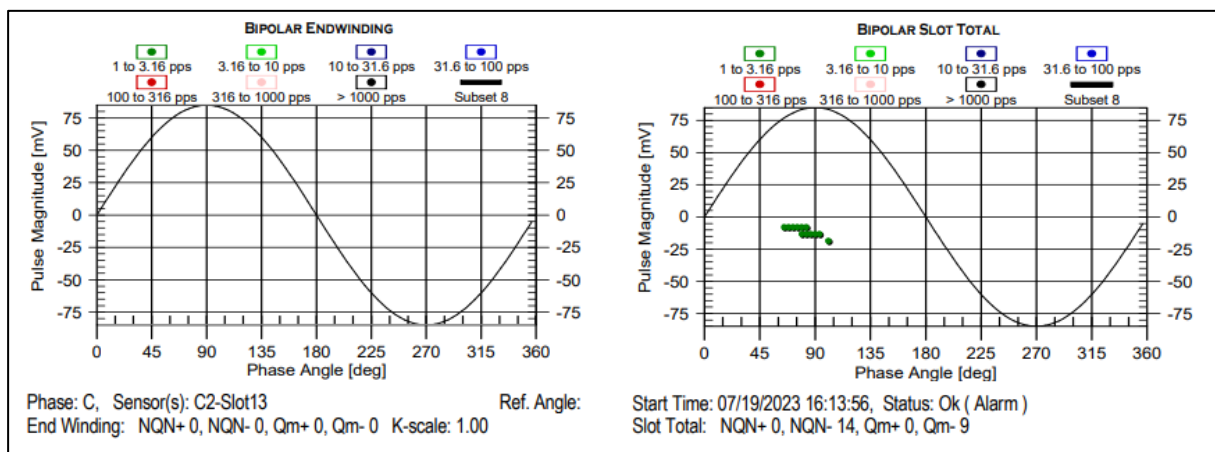
Obr. 2: WEB rozhraní NEMES – trendy částečných výbojů v čase



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



Obr. 4: Časový záznam trendu částečných výbojů generátoru 2



Obr. 5: Rozložení impulsů částečných výbojů vzhledem k periodě střídavého napětí generátoru 2 při působení varovné signalizace



Tab. 1: Výsledky měření částečných výbojů generátoru 1 za období let 2015 až 2022

	<b>Generátor 1</b>							
<b>Rok</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<b>P [MW]</b>	1091	1085	1080	1080	1092	1090	1091	1098
<b>U [kV]</b>	23,1	23,4	23,5	23,4	23,6	23,5	23,6	23,7
<b>T [°C]</b>	24	26	27	27	27	54	54	54
<b>P-H2[kPa]</b>	507	512	508	500	506	509	507	508
<b>Fáze / drážka</b>	<b>U1 / 42</b>							
<b>Slot Qm+ [mV]</b>	19	19	22	24	26	30	27	26
<b>Slot Qm- [mV]</b>	17	19	22	23	25	28	26	25
<b>EW Qm+ [mV]</b>	2	0	0	0	1	2	0	0
<b>EW Qm- [mV]</b>	5	7	6	8	7	9	8	8
<b>Fáze/drážka</b>	<b>U2 / 27</b>							
<b>Slot Qm+ [mV]</b>	4	7	6	7	7	8	7	5
<b>Slot Qm- [mV]</b>	3	7	6	6	7	7	7	8
<b>EW Qm+ [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>EW Qm- [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 2: Výsledky měření částečných výbojů generátoru 2 za období let 2015 až 2022

	<b>Generátor 2</b>							
<b>Rok</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<b>P [MW]</b>	1080	1092	1090	1086	1091	1090	1087	1098
<b>U [kV]</b>	23,4	23,6	23,5	23,4	23,6	23,4	23,5	23,5
<b>T [°C]</b>	27	27	26	27	27	54	54	54
<b>P-H2[kPa]</b>	500	506	509	504	505	507	508	506
<b>Fáze / drážka</b>	<b>U1 / 42</b>							
<b>Slot Qm+ [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Slot Qm- [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>EW Qm+ [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>EW Qm- [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Fáze/drážka</b>	<b>U2 / 27</b>							
<b>Slot Qm+ [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Slot Qm- [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>EW Qm+ [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>EW Qm- [mV]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0



## STÁRNUTÍ PAROGENERÁTORŮ A MECHANICKÉ ČIŠTĚNÍ JEJICH SEKUNDÁRNÍ STRANY

### AGEING MANAGEMENT OF STEAM GENERATORS AND THEIR MECHANICAL CLEANING

Jakub Ertl<sup>a)</sup>, Daniel Dukovský<sup>a)</sup> a Lukáš Joch<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Řízení techniky JE, ČEZ, a. s.

<sup>b)</sup> ÚAM Brno

#### Abstrakt

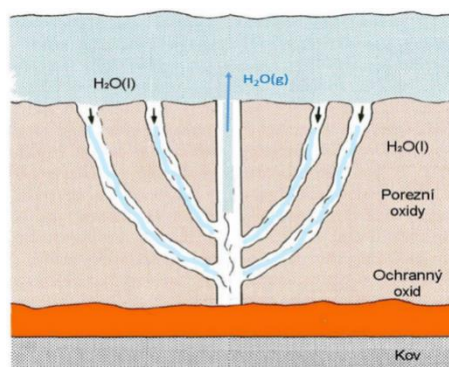
Řešení problematiky stárnutí parogenerátorů JE Dukovany je jednou z klíčových oblastí řízení stárnutí a dlouhodobého provozu JE Dukovany. V rámci programu řízení stárnutí zaměřeného na parogenerátory JE Dukovany byly identifikovány příčiny stárnutí jejich teplosměnné plochy a v návaznosti na to bylo provedeno pilotní mechanické čištění některých z nich. V příspěvku jsou popsány příčiny stárnutí teplosměnné plochy parogenerátorů JE Dukovany včetně způsobu a koncepce unikátního mechanického čištění, které bylo tímto způsobem a v tomto rozsahu provedeno na JE Dukovany jako na první jaderné elektrárně ze všech provozovaných JE VVER 440.

#### Abstract

Solving the issues of steam generators aging is one of the key areas of aging management and long-term operation of Dukovany NPP. The causes of the steam generators' heat exchange tubes degradation were identified in the frame of the aging management program. A pilot mechanical cleaning of the steam generators' secondary side was carried out according to the requirements of the aging management program. This paper describes the causes of the heat exchange tubes aging including the method and concept of the unique mechanical cleaning which was carried out in this way in the Dukovany NPP as in the first VVER 440 nuclear power plant.

#### Úvod

Korozní produkty sekundárního okruhu jaderné elektrárny vstupují s napájecí vodou do sekundární strany parogenerátorů a následně se usazují ve formě nánosů na teplosměnných trubičkách. V důsledku rozdílné teplotní roztažnosti nánosů a teplosměnných trubiček dochází k jejich opadávání do spodní části PG, kde mohou následně tvořit shluky nečistot. V případě zahuštění štěrbinového prostředí zachyceného na obr. 1 a jeho významného odklonu od neutrálního vysokoteplotního štěrbinového pH dochází v místě zanesení teplosměnných trubiček k významnému působení degradačního mechanismu známého jako korozní praskání pod napětím.



Obr. 1: Zahuštění štěrbinového prostředí mezi trubičkou a nánosem [1, 2]

## Expertní tým programu řízení stárnutí parogenerátorů (ExT PŘS PG)

V roce 2019 byl pro JE Dukovany ustanoven ExT PŘS PG s cílem nalezení příčin zrychleného stárnutí teplosměnné plochy parogenerátorů. Jako jednu z více souvisejících a vzájemně propojených příčin zrychleného stárnutí teplosměnné plochy PG EDU identifikoval ExT PŘS PG míru zanesení teplosměnné plochy včetně akumulování nečistot přímo uvnitř teplosměnného svazku. Vznik korozních produktů je přirozeným jevem sekundárního okruhu JE a míru zanášení sekundární strany parogenerátorů je možné ovlivnit správným způsobem řízení stárnutí. Tento způsob spočívá především ve:

- vhodně nastaveném chemickém režimu,
- vhodném odluhování a odkalování sekundární strany parogenerátorů,
- vhodně nastavené preventivní údržbě – např. čištění sekundární strany parogenerátorů.

## Koncept pilotního mechanického čištění PG26 JE Dukovany

Koncept mechanického čištění je založen na uzavřeném okruhu, kde vysokotlaký vodní paprsek ostříkuje mezery mezi teplosměnnými trubičkami a rozrušuje usazené korozní produkty a nánosy, které jsou následně vyplaveny ze sekundární strany parogenerátoru. Proces je prováděn dálkově ovládanými manipulátory umístěnými uvnitř sekundární strany parogenerátoru. Demineralizovaná voda je vsťikována přes pohyblivý vysokotlaký rozprašovač a nečistoty jsou pak unášeny proudem do sacích trysek a následně čerpány do nádrže a filtrovány přes filtrační jednotky. Voda vyčištěná na filtrech je poté vysokotlakými čerpadly vrácena zpět do trysek čisticího manipulátoru. Tato uzavřená smyčka minimalizuje potřebné množství vody pro čištění sekundární strany parogenerátoru.

Filtrační jednotky se skládají ze dvou paralelně propojených identických linií a jsou vybaveny filtry v řádu mikronů. Na druhou linii filtrů se přepíná v případě, je-li absorpce filtrů vyčerpána. Tím je zajištěn nepřetržitý průběh čištění.

Sací vakuová čerpadla odsávající uvolněné nečistoty ze sekundární strany parogenerátoru jsou napojena na nátrubek odluhu u studeného dna PG, technologickou přírubu, drenáž a nátrubky odkalu z kapes kolektorů.

Manipulátory jsou do prostoru mezi sekcemi teplosměnného svazku upevňovány manuálně a pohyb manipulátoru je ovládán dálkově pracovníky, kteří mají stanoviště v boxu parogenerátorů. Čisticí hlava manipulátoru během čištění rotuje a umožňuje nastavit různé konfigurace čisticích trysek (přímý svazek nebo plošný ostřík) směřovaných vertikálně ke dnu parogenerátoru nebo horizontálně do mezery mezi teplosměnné trubičky.

Za účelem čištění některých sekcí teplosměnného svazku parogenerátorů JE Dukovany je nezbytné dočasně vyříznout výztuhu podpěrného systému v podélných sektorech, která brání vstupu manipulátorů do teplosměnného svazku. Tato výztuha je zachycena na obr. 2.

## Rozsah pilotního mechanického čištění PG26 JE Dukovany

Mechanické čištění parogenerátoru JE Dukovany je možné uskutečnit pouze v sekcích, do kterých je možné umístit manipulátor. Již před realizací mechanického čištění PG26 rozhodl ExT PŘS PG neprovádět čištění v centrálním koridoru teplosměnného svazku, pokud to nebude nezbytně nutné.



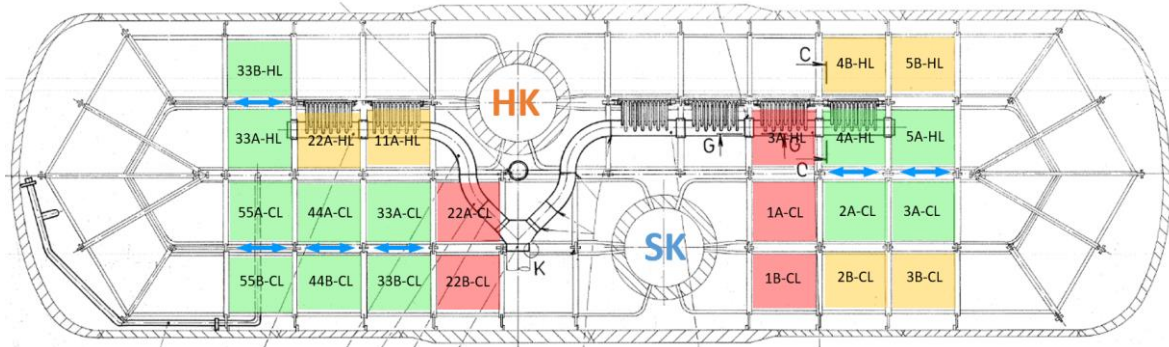
Obr. 2: Výztuha podpěrného systému v podélných sektorech teplosměnného svazku [3]  
Důvody tohoto rozhodnutí byly následující:

- přítomnost původního rozvodu napájecí vody umožňovala čištění u většiny sekcí pouze v horní polovině teplosměnné plochy,
- v oblasti mezi studeným kolektorem a studeným dnem parogenerátoru s bočním průlezem se nad centrálním koridorem nachází potrubí kontroly těsnosti kolektoru, které je třeba v případě čištění vyhnout,
- velikost mezery v teplosměnné ploše centrálního koridoru v ose parogenerátoru je významně větší než v případě bočních koridorů, což zvyšuje riziko poruchy čistícího manipulátoru z důvodu větších vůlí mezi teplosměnnými trubičkami a čistící hlavou.

Během pilotního čištění PG26 však bylo nezbytné operativně měnit rozsah čištění a pořadí sekcí původně plánovaných pro čištění. Všechny změny byly řízeny a odsouhlaseny expertním týmem čištění PG26, který vznikl transformací expertního týmu PŘS PG za účelem zajistit operativní řešení technických problémů spojených s pilotním čištěním parogenerátoru v tak velkém rozsahu a s využitím technologie vyvinuté speciálně k tomuto účelu. Kromě zjištěné nepřístupnosti sekce 22CL (kolize s kalhotovým kusem RNV) a sekce 1CL (kolize s potrubím SHN), nebylo možné taktéž uskutečnit čištění v sekci 5HL z důvodu malé mezery ve vedlejším koridoru (odskočená teplosměnná trubička). Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vyhnutí potrubí SKTOV nad centrálním koridorem mezi sekcemi 4HL/2CL a 5HL/3CL, tak aby bylo možné provést čištění sousedních sekcí alespoň ze středového koridoru teplosměnného svazku.

Na obr. 3 je zachycen rozsah provedeného čištění teplosměnného svazku PG26. Modré šipky na tomto obrázku znázorňují místa vstupu čistícího manipulátoru. V průběhu čištění PG26 bylo zjištěno, že účinnost čištění z pohledu dostřiku paprsku vody je vyšší, než se předpokládalo a paprsek čistící vody je schopný projít několika sekcemi současně. Z tohoto důvodu jsou na obr. 3 zvýrazněny žlutou barvou sekce, které byly pravděpodobně čištěny, avšak nebyly v přímém kontaktu s čistícím manipulátorem. Zelené sekce pak na tomto obrázku představují sekce teplosměnné plochy PG26, které byly v přímém kontaktu s čistícím manipulátorem. Červeně zvýrazněné sekce znázorňují místa, která oproti původnímu plánu čištění PG26 nemohla být čištěna.





Obr. 3: Skutečný rozsah čištění PG26 během 2GO21 [3]

## Závěr

Během pilotního čištění PG26 bylo vyneseno ze sekundární strany 785.3 kg nečistot v mokřím stavu. Lze konstatovat, že při čištění 33% teplosměnné plochy tohoto parogenerátoru byla odstraněna minimálně polovina z odhadovaného množství nečistot kumulovaných v PG26.

Předem stanovené radiační dávky pracovníků provádějících upínání manipulátoru uvnitř PG26 byly rovněž dodrženy při respektování principu ALARA. Provedené čištění PG26 bylo realizováno při zachování stanoveného harmonogramu a při zachování kvality a bezpečnosti celého procesu.

Celý postup čištění byl před vlastní realizací podroben důkladnému procesu kvalifikace realizovaném na mock-up reálného parogenerátoru JE Dukovany. Cílem kvalifikace bylo:

- ověřit, zda prostor uvnitř PG je postačující pro plánované práce spojené s čištěním,
- ověřit, že všechny definované konstrukční překážky jsou dostatečně řešeny v celém konceptu čištění,
- nacvičit upínání manipulátorů uvnitř PG a další činnosti pracovníků pohybujících se na sekundární straně pro zajištění čištění PG,
- kvalifikovat techniku manipulátorů pro čištění – výpočty a testy prokazující nepoškození trubiček vlivem ostříku,
- ověřit dostřik manipulátoru a konzervativní požadavek, že nebudou přímo ostříkovány teplosměnné trubičky.

Vlastní čištění PG26 bylo rozděleno na dvě na sebe navazující fáze. V rámci první fáze byly provedeny kontroly (kontrola vířivými proudy a kontrola těsnosti bublinkovou metodou) celé teplosměnné plochy PG26 před čištěním, čištění pilotní sekce a kontrola vířivými proudy po čištění pilotní sekce. Na základě vyhodnocení těchto kontrol po čištění pilotní sekce rozhodnul expertní tým čištění PG26 o čištění ostatních plánovaných sekcí PG26. Po ukončení čištění všech sekcí PG26 pak byly opět provedeny kontroly teplosměnné plochy PG26 ve stejném rozsahu jako před čištěním. Tyto kontroly potvrdily výsledky provedené kvalifikace, tj. že vlastní čištění neovlivňuje negativně stav teplosměnné plochy.

## Literatura

- [1] Expertní tým PŘS PG EDU. *Závěry expertního týmu PŘS PG EDU pro vypořádání PNČ 8284 a PNČ 8750\_rev\_2*, říjen 2019.
- [2] Expertní tým PŘS PG EDU. *Nastavení chemického režimu PG EDU (VVER 440) – Vysokoteplotní pH(t)*, arch. č. ExT-PŘS-PG-EDU-06-2020, červen 2020.
- [3] Expertní tým PŘS PG EDU. *Expertní tým PŘS PG EDU: Popis průběhu a vyhodnocení pilotního mechanického čištění PG26*, arch. č. ExT-PŘS-PG-EDU-06-2020, červen 2020.

## ULTRAZVUKOVÁ KONTROLA OCHRANY POVRCHU KOMPONENT PRO ENERGETIKU

## ULTRASONIC INSPECTION OF SURFACE PROTECTION OF POWER COMPONENTS

Jana Veselá

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

### Abstrakt

Povrchová úprava je speciální ošetření povrchu materiálu nebo komponenty např. opracováním, zpracováním nebo nanesením vrstvy jiného materiálu. Pro realizaci ochrany povrchu je několik důvodů, zejména zvýšení odolnosti základního materiálu proti korozi, otěru, zvýšené teplotě apod., nebo pro zlepšení mechanických, chemických, estetických, třecích vlastností povrchu.

V oblasti energetiky jsou kromě klasických nátěrů široce rozšířené žárové nástřiky. Blíže se článek zaměřuje na ultrazvukovou kontrolu nástřiků provedených elektrickým obloukem TWAS (Twin Wire Arc Spray) a Cold Spray (CS). Volba typu nástřiku bere ohled na konečný požadavek ochrany povrchu před korozi, otěrem a jinými provozními vlivy. Nástřiků může být také využíváno jako opravných ke změně geometrie komponenty, nebo pro opravu již nalezené povrchové vady. Deponované tloušťky nástřiků se mohou pohybovat v řádu desítek mikronů až po jednotky mm.

Základní metodou nedestruktivního zkoušení (NDT) ověřující kvalitu nanesených povlaků je ultrazvukové zkoušení technikami pulse-echo (PEUT) a phased array (PAUT). Mezi základní měřené vlastnosti ochranných povlaků je měření útlumu před a po nástřiku, nedestruktivní hodnocení tloušťky nástřiku a jeho přilnutí k základnímu materiálu. Výsledky NDT jsou obvykle validovány destruktivními zkouškami, kam patří metalografické hodnocení mikrostruktury nástřiku a hodnocení porozity.

### Abstract

Surface treatment is a special treatment of the surface of a material or component, e.g., by machining, processing, or applying a layer of another material. There are several reasons for the implementation of surface protection, especially to increase the resistance of the base material against corrosion, abrasion, elevated temperature, etc., or to improve the mechanical, chemical, aesthetic, and friction properties of the surface.

In the field of energy, in addition to classic coatings, thermal sprays are widely used. In more detail, the article focuses on the ultrasonic inspection of sprays made by electric arc TWAS (Twin Wire Arc Spray) and Cold Spray (CS). The choice of spray type considers the final requirement of surface protection against corrosion, abrasion, and other operational influences. Injections can also be used as repairs to change the geometry of the component or to repair an already found surface defect. The deposited coating thicknesses can range from tens of microns to units of mm.

The basic non-destructive testing (NDT) method for verifying the quality of applied coatings is ultrasonic testing using pulse-echo (PEUT) and phased array (PAUT) techniques. Among the basic measured properties of protective coatings is the measurement of attenuation before and after spraying, non-destructive evaluation of the thickness of the coating, and its adhesion to the base material. NDT results are usually validated by destructive tests, which include metallographic evaluation of the injection microstructure and porosity evaluation.



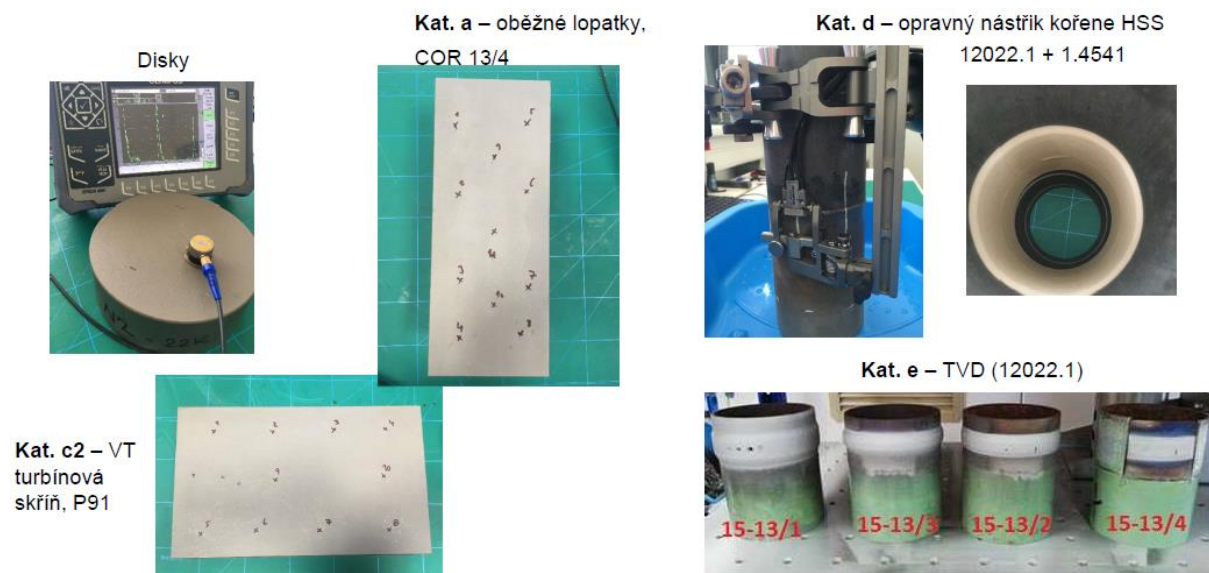
## Úvod

Centrum výzkumu Řež se v oblasti ochrany povrchu věnuje nedestruktivnímu testování již několik let. Do zkoumané skupiny ochrany povrchu proti korozi, zlepšení mechanických vlastností, zvýšení oteruvzdornosti apod. spadají nástřiky Cold spray i žárové nástřiky.

Pro zkoušení byla použita ultrazvuková metoda se zaměřením na ultrazvukové vlastnosti jednotlivých typů ochrany povrchu. Mezi základní vlastnosti patří prozvučitelnost nástřiků, vliv použitého materiálu na změnu rychlosti šíření oproti základnímu materiálu, měření tloušťky nástřiku, hodnocení přilnutí nástřiku k ZM, detekovatelnost defektů v základním materiálu (ZM) i nástřiku samotném.

## Vývoj v oblasti Cold spray

Celkem čtyři roky byly věnovány ověřování kvality CS nástřiků a jejich přilnutí k základním materiálům používaným v energetice, šlo o oceli 22K, 08CH18N10T, COR13/4 a P91. U ochrany kořenové oblasti HSS byly jako ZM použity oceli 12 022 a 1.4541, obr. 1.



Obr. 1: Zkušební tělesa projektů CS

Depozice CS nástřiků NiCr o velikosti částí 10-32  $\mu\text{m}$  a 5-25  $\mu\text{m}$  a nástřik Ni se zrnitostí 15-35  $\mu\text{m}$  vnitřní i vnější tryskou. Všechny nástřiky v rámci navazujících projektů NCE byla realizována firmou Impact Innovation. Nástřiky byly použity pro ochranu, změnu geometrie na vnějších i vnitřních površích zkušebních těles a u všech ZM bylo nejprve provedeno vstupní měření PEUT a PAUT a tyto byly opakovány po depozici CS nástřiků. V rámci UT se provádělo měření tloušťky nástřiků, měření útlumu a detekce případných umělých vad typu jiskřených vrubů (EDM), nebo vývrtů s plochým dnem (FBH).

Portfolio 5 různých ultrazvukových sond bylo testováno pro následné využití při PEUT. Cílem bylo nalézt sondy vhodné k provádění ultrazvukového zkoušení se zaměřením na výše uvedené vlastnosti. Výsledky ultrazvukového zkoušení byly porovnávány s výsledky metalografického hodnocení CS nástřiků, hodnocena byla zejména porozita nástřiků, rozhraní nástřik-ZM a přítomnost případných trhlin v nástřicích.

Pro přesné měření tloušťky CS nástřiků bylo navrženo a celkem vyrobeno 5 ks stupňových měrek s označením CS A až CS E, tabulka 1.

Tab. 1: Stupňové měrky CS

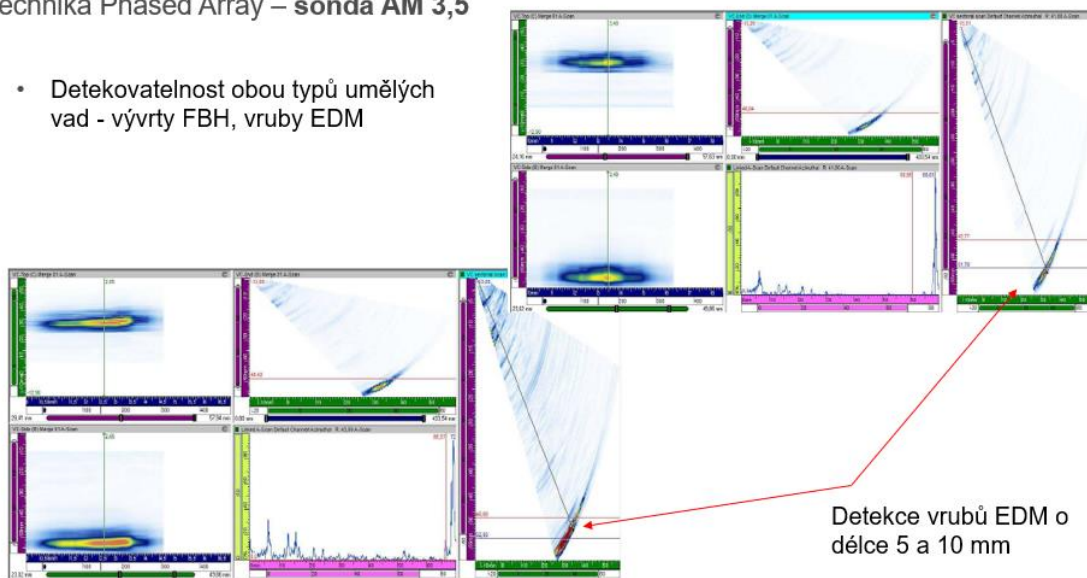
Označení měrky	Velikost částic prášku	Použitá tryska	Deponovaný materiál
CS A	10-32 $\mu\text{m}$	vnější	NiCr
CS B	5-25 $\mu\text{m}$	vnitřní	NiCr
CS C	10-32 $\mu\text{m}$	vnitřní	NiCr
CS D	15-35 $\mu\text{m}$	vnitřní	Ni
CS E	15-35 $\mu\text{m}$	vnější	Ni

U měrek bylo realizováno metalografické vyhodnocení porozity a pro srovnání byla provedena He pyknometrie. Porozita je jednou z hlavních technologických vlastností ovlivňující průchod ultrazvuku CS nástřikem.

Na obr. 2 jsou uvedeny výsledky PAUT na disku o průměru 130 mm s EDM vruby o délce 5 a 10 mm a hloubce 2 a 5 mm, které byly vyrobeny v ZM před depozicí CS nástřiku NiCr. Na obr. 3 je záznam PAUT s detekcí obou EDM vrubů v ochranném nástřiku NiCr kořene HSS.

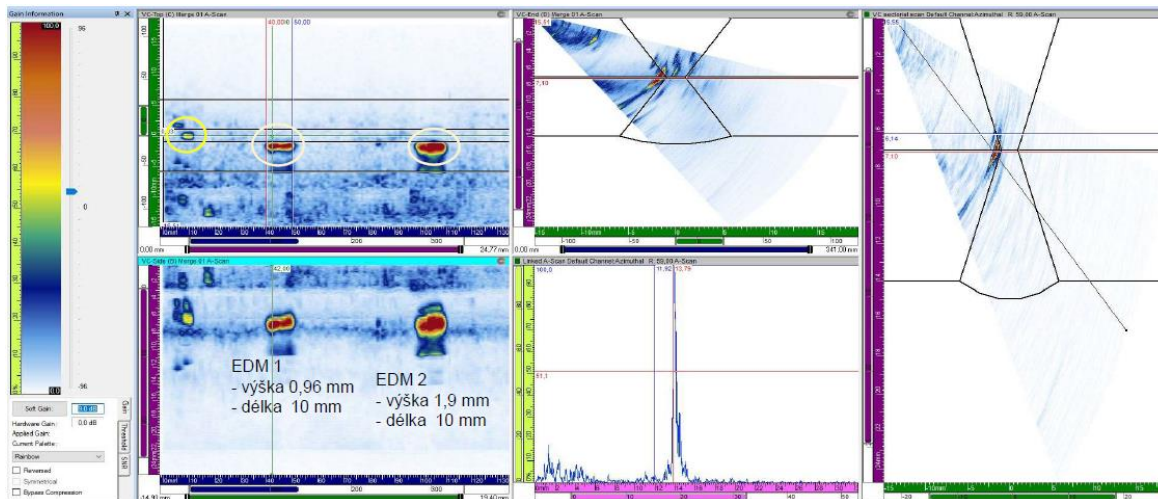
Technika Phased Array – sonda AM 3,5

- Detekovatelnost obou typů umělých vad - vývrty FBH, vruby EDM



Obr. 2: PAUT disku s umělými vadami v ZM po nástřiku NiCr

V pokročilé fázi projektů již byla technologie CS nástřiků zaměřena na konkrétní aplikaci na elektrárně. Jednalo se o ochranu kořenové oblasti heterogenního svarového spoje (HSS). Aplikace CS byla realizována na trubce TR KR 88,9x6,3 a při UT byla měřena tloušťka vnitřního nástřiku, hodnoceno přilnutí k oběma ZM. Pro výrobu EDM v CS nástřiku bylo trubkové těleso rozříznuto a následně pro realizaci enkódovaného měření technikou PAUT slepeno, obr. 3.

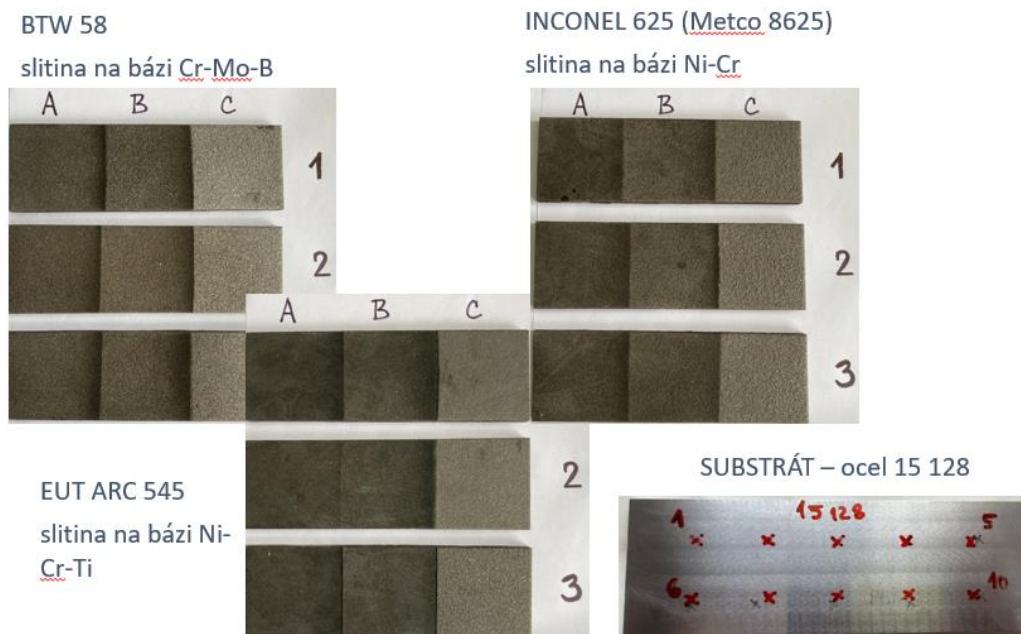


Obr. 3: PAUT ochranného nástřiku NiCr kořenové oblasti HSS s EDM vruby

Výstupem projektů CS nástřiků v oblasti NDT byla celá řada technických zpráv a také inspekční postupy měření vlastností vnitřního nástřiku na nátrubku PG s označením N5 a vnějších povlaků Cold Spray ultrazvukem vydané jako publikační listy CVŘ s označením PL3590 a PL4059.

### Vývoj v oblasti žárových nástřiků

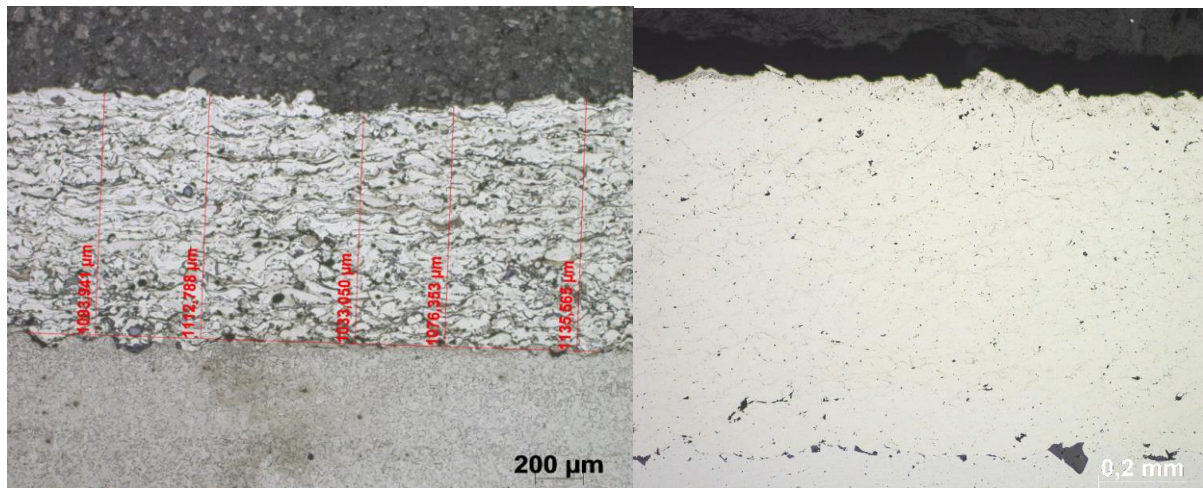
V rámci projektů zaměřených na CS byla využita možnost spolupráce s VZÚ Plzeň a testovány pomocí UT také různé vzorky se žárovými nástřiky vyrobených elektrickým obloukem, tzv. TWAS. Pro testovací nástřiky byly použity materiály s teplotní i abrazivní odolností BTW58 na bázi Cr-Mo-B, Eutronic ARC 545 na bázi Ni-Cr-Ti a Metco 8625 na bázi Ni-Cr. Celkem byly vyrobeny od každého typu nástřiku 3 vzorky s tloušťkami vrstev 0,5-0,75-1 mm, obr. 4.



Obr. 4: Vzorky TWAS

Při zkoušení PEUT byly využívány stejné postupy jako tomu bylo u CS nástřiků. Ve srovnání s nimi žárové nástřiky díky dané technologii depozice materiálu nástřiku obsahují mnohem větší množství porů a splatů ve srovnání s nástřiky CS, metalograficky doloženo na obr. 5.





Obr. 5: Srovnání nástřiku a rozhraní s ZM u TWAS (BTW58 vlevo) a CS (NiCr vpravo)

Porozita a oxidy uzavřené mezi jednotlivými splyty jsou rozhraními, které buď zcela, nebo alespoň částečně brání průchodu ultrazvuku a dochází na nich k rozptylu ultrazvukového svazku. Pro možnost srovnat měřené tloušťky s výsledky 3D skenování, které bylo realizováno na ZM před a po nástřiku a metalografickým hodnocením na řezech kolmých k rozhraní ZM-nástřik, bylo nutné provést řadu měření. Přímé výsledky ultrazvukové kontroly nedávají přímo hodnotu tloušťky vrstvy, ale na základě jednoduchého statistického vyhodnocování je možné získat tzv. přepočtový koeficient. V praxi by ovšem bylo obtížné takto postupovat, a to zejména z důvodu, že neexistuje srovnání s metalografií a 3D skenem.

### Závěr

Mezi základní ultrazvukové vlastnosti nástřiků CS patří rychlost šíření ultrazvuku, která je nezbytná ke správnému měření tloušťky nástřiku CS, měření útlumu a posouzení tvaru poklesu opakovaných koncových ech. Rychlost šíření ultrazvuku je kalibrována pro celkovou tloušťku tělesa, bez ohledu na rozdílný materiál nástřiku s ohledem na jeho zanedbatelnou tloušťku vůči celkové tloušťce. Rychlost je zapotřebí znát pro provozní měření tloušťky nástřiku a jeho případného úbytku. Při měření tloušťky nástřiku CS je s ohledem na rozlišitelnost echa od rozhraní nástřik-ZM od koncového echa lépe zkoušet ze strany základního materiálu.

V praxi je nutné provádět kalibraci na kalibrační měrce, nejlépe na stupních s tloušťkou nejbližší očekávané celkové tloušťce. Pro měření útlumu není rozhodující, zda se měří z povrchu nástřiku nebo z povrchu základního materiálu. Důležitým faktorem je stav povrchu a vybraná ultrazvuková sonda. Vhodnost použité sondy musí být ověřena na kalibrační měrce, která z pohledu materiálu a technologie provedení odpovídá typu aplikovaného CS nástřiku.

### Poděkování

Předložené výsledky vznikly díky projektu podporovaného TA ČR č. TN01000007 v rámci Programu Národního centra kompetence - 1. VS.

*Práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293.*

## Reference

- [1] VESELÁ, Jana, MAREŠ, Pavel, ŠPIRIT, Zbyněk a BROM, Jaroslav. Quality verification of Cold spray protection of the weld root. In: *COMAT 2022*. Plzeň: COMTES FHT a.s., 2022.
- [2] VESELÁ, Jana. *Rešerše možností nedestruktivních kontrol nástřiků Cold Spray*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., březen 2019, technická zpráva, PL3023.
- [3] VESELÁ, Jana a BROM Jaroslav. *Stanovení programů na provádění VaV v oblasti nedestruktivní kontroly nástřiků Cold Spray*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., duben 2019, technická zpráva, PL3078.
- [4] VESELÁ, Jana a MAREŠ, Pavel. *Nástřik Cold Spray - výsledky ultrazvukového zkoušení*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., listopad 2020, technická zpráva, PL3504.
- [5] VESELÁ, Jana a MAREŠ Pavel. *NCK PB1.15 Výstup č. VI.15.3 - Inspekční postup ručního ultrazvukového zkoušení technikou Phased Array heterogenního svaru nátrubku N5 s vnitřním nástřikem Cold Spray*. Plzeň, prosinec 2020, technická zpráva, PL3590
- [6] VESELÁ, Jana a MAREŠ, Pavel. *Zkoušky ověřující IP zkoušení nátrubku N5 s vnitřním CS nástřikem*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2020, technická zpráva, PL3761.
- [7] HOUDKOVÁ, Šárka, ŠULCOVÁ, Petra a LENCOVÁ, Kateřina. *Hodnocení mikrostruktury, základních mechanických a funkčních vlastností povlaků nanesených metodami CS a TWAS pro povrchovou ochranu komponent v JE a KE*. Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., prosinec 2020, výzkumná zpráva, VZU-VZ-07/20/023.
- [8] VESELÁ, Jana a BROM, Jaroslav. *Vývoj metodiky měření tloušťky žárových nástřiků zhotovených metodou TWAS a ověření ultrazvukových vlastností materiálu vnějších a vnitřních povlaků CS*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., březen 2021, technická zpráva, PL3964.
- [9] VESELÁ, Jana. *NCK DP7.1 – Rešerše možností nedestruktivního měření tloušťky žárového nástřiku TWAS*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., březen 2021, technická zpráva, PL3871.
- [10] CHOCHOLOUŠEK, Michal, ŠPIRIT Zbyněk, BRICÍN, David, FULÍN, Zdeněk a BROM, Jaroslav. *V7.1.7 – Ověřené materiálové vlastnosti povlaků Cold Spray z prášku Ni a vnitřních povlaků Cold Spray z prášku NiCr*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2021, technická zpráva, PL4130.
- [11] PEKOVIČ, Michal, HOUDKOVÁ, Šárka, DLOUHÁ, Žaneta a NAĐOVÁ, Jana. *Porovnání vlastností různě tepelně zpracovaných povlaků nanesených metodou Cold Spray*. Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., prosinec 2021, výzkumná zpráva, VZU-TNZ-37/21/062.
- [12] VESELÁ, Jana, ŠPIRIT, Zbyněk a BROM, Jaroslav. *CS – výsledky ultrazvukového zkoušení válcových těles a metalografie*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., leden 2022, technická zpráva, PL4046.

# VLIV LASEROVÉHO KULIČKOVÁNÍ NA ÚNAVOVOU PEVNOST LITÉ MARTENZITICKÉ NEREZOVÉ OCELI V PROSTŘEDÍ ŘÍČNÍ VODY

## EFFECT OF LASER PEENING TREATMENT ON HIGH CYCLE FATIGUE STRENGTH OF CAST MARTENSITIC STAINLESS STEEL IN RIVER WATER ENVIRONMENT

Josef Strejcius, Zdeněk Fulín, Zbyněk Špirit a David Bricín

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

### Abstrakt

Byla studována únavová korozní pevnost lité martenzitické korozivzdorné oceli COR13/4, používané v hydroenergetickém průmyslu, v neošetřeném stavu a ve dvou stavech po laserovém zpevnění. Zpracování experimentálních vzorků technologií LSP bylo provedeno pomocí diodově čerpaného pevnolátkového laseru s vlnovou délkou 1030 nm, se čtvercovým tvarem svazku 2,5 x 2,5 mm, s pulzy o frekvenci 10 Hz. Byla použita ablační vrstva v podobě černé vinylové pásky o tloušťce 100  $\mu\text{m}$  a laminární film ( $\sim 1$  mm) proudící vody. Byly použity dvě strategie kuličkování: jedna vrstva s hustotou výkonu 8  $\text{GW}/\text{cm}^2$  a dvě vrstvy s hustotou výkonu 6  $\text{GW}/\text{cm}^2$ . Korozně-únavové zkoušky byly prováděny ve čtyřbodovém ohybu s konstantním středním předpětím a zatěžovací frekvencí 50 Hz. Únavová pevnost zpevněné oceli byla v obou případech výrazně vyšší než mez únavy neupraveného základního materiálu.

### Abstract

The high cycle fatigue-corrosion performance of a cast martensitic stainless-steel equivalent to CA6NM, used in the hydropower generation industry, in untreated and two laser-peened conditions, was investigated. The LSP processing of experimental samples has been performed at the HiLASE R&D laboratories using the diode pumped solid state laser with the top-hat beam 1030 nm with a square shape 2,5 x 2,5 mm and 10 ns pulses at 10 Hz. The peening setup utilized protective coating in the form of 100  $\mu\text{m}$  black vinyl tape and a laminar film ( $\sim 1$  mm) of flowing water. Two peening strategies were used: one layer with a power density of 8  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , and two layers with and power density of 6  $\text{GW}/\text{cm}^2$ . Corrosion-fatigue tests were conducted in four-point bending with the constant mean pre-stress 350 MPa and the loading frequency 50 Hz. The fatigue strength of the peened steel in water was always higher than the fatigue strength of the untreated base material.

### Úvod

Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. se v minulých letech podílela na vývoji metodiky pro kvalifikovaný odhad rizika únavového poškození oběžných kol z martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli GX4CrNi13-4+QT1 (COR 13/4). Za účelem stanovení podmínek, za kterých dochází k iniciaci korozně-únavových trhlin, byl vyvinut postup měření vysokocyklické únavy ve vodním prostředí při jednoosém zatěžování v tahu/tlaku na rezonančním stroji s frekvencí zatěžování do 125 Hz, umožňující sledovat on-line poškození zkušebních těles na základě měření změny rezonanční zatěžovací frekvence nebo elektrochemických měření. Byly stanoveny S-N křivky s vyhodnocením pro  $10^8$  cyklů na hladkých a vrubovaných válcových tyčích při asymetrii cyklu  $R=0, -1$  a středním předpětím  $\sigma_m = 330$  MPa, na vzduchu a v proudící vodě s obsahem chloridu sodného 500 mg/l, při teplotě 15  $^{\circ}\text{C}$ , při rovnovážném obsahu rozpuštěného kyslíku, kontrolovaném pH, s měřením elektrochemického elektrodového potenciálu a proudového šumu [1, 2].

Dále byly stanoveny rychlosti šíření únavových trhlin v oceli COR13/4 při asymetrii cyklu  $R = 0,1$  a frekvenci zatěžování 30 Hz na vzduchu a ve vodě. Pro měření rychlosti růstu korozně-



únavových trhlin ve vodě byla vyvinuta metodika měření na CT vzorcích, s určením okamžité délky trhliny z kontinuálního záznamu rozdílu elektrických potenciálů nad trhlinou ve vzorku protékaném konstantním proudem (DCPD) [3].

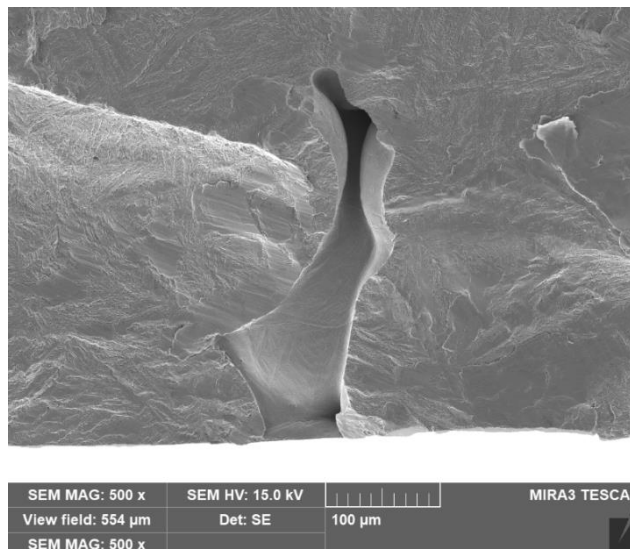
Byly též provedeny únavové zkoušky svarových spojů oceli COR 13/4 s přidavným materiálem Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER 2209 metodami 141 a 135, imitující opravné svary oběžných kol vodních turbín. Pro obě varianty svarového spoje byly stanoveny časované meze únavy ve vodě při asymetrii zátěžného cyklu  $R=-1$  a středním předpětím  $\sigma_m = 330$  MPa a provedeno měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněných zónách oceli COR 13/4 na kompaktních vzorcích (CT) zatěžovaných v tahu při frekvenci 30 Hz.

Na základě fraktografické analýzy mnoha zkušebních těles po únavových testech bylo vyhodnoceno, že jedním z největších faktorů majících vliv na únavovou pevnost je existence vnitřních metalurgických vad typu licích kavit. Tyto vady mívají rozměr až 200  $\mu\text{m}$  a v závislosti na místě výskytu působí jako koncentrátoři napětí a místa iniciace únavových trhlin.

Pozitivní zkušenosti s aplikací technologie laser shot peening na únavovou pevnost [4, 5] nás přivedly k experimentu, jehož cílem bylo ověření možnosti potlačení působení metalurgických vad v oceli COR 13/4 zpevněním povrchu zkušebních těles mechanickou rázovou vlnou generovanou při dopadu paprsku pulzního laseru.

### Experimentální materiál

Materiál použitý v této práci byla martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN, COR 13/4) v zušlechťeném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu) firmou Litostroj Engineering, a.s. Materiál byl dodán společností ČEZ a.s. ve formě přilýtých zkušebních bloků z výroby rozváděcích lopatek. Chemické složení odpovídalo předepsanému složení oceli COR 13/4. Tepelné zpracování bylo provedeno režimem kalení  $1050 \pm 15$  °C / 15 h / vzduch // popuštění  $610 \pm 10$  °C / 18 h / vzduch // žíhání  $580 \pm 10$  °C / pec. Materiál byl izotropní, struktura byla tvořena popuštěným laťkovým martenzitem s malým množstvím  $\delta$  feritu. Ve struktuře byly oxidické vměstky. V materiálu byly licí vady ve formě kavit - obr. 1. Obsah reformovaného austenitu v oceli stanovený rentgenovou difrakcí činil cca 11 %.



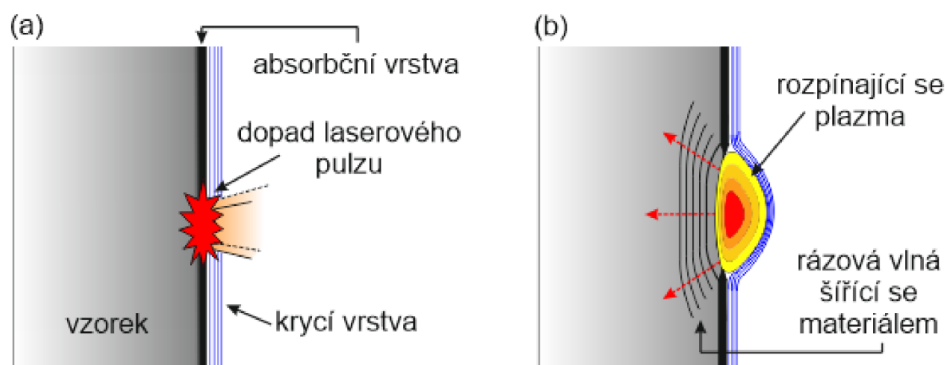
Obr. 1: Licí vada vystupující na povrch vzorku

### Laserové kuličkování – Laser Shot Peening

Laser Shock Peening (LSP) je moderní bezkontaktní technologie zpevňování povrchu kovových materiálů na principu působení rázových vln, které se generují během interakce krátkých

laserových pulzů s povrchem materiálu. Rázové vlny v materiálu vyvolávají strukturní změny, které mají za důsledek vznik zbytkového tlakového napětí. Vnesené tlakové napětí obecně zlepšuje únavové vlastnosti materiálu, brání vzniku a šíření trhlin.

Při laserovém kuličkování je zkušební část vzorku pokryta tenkou absorpční vrstvou – černou vinylovou páskou. Tato vrstva napomáhá absorpci laserového záření, ale hlavně pak chrání povrch vzorku před tepelnými jevy, které doprovázejí absorpci laserového pulzu. Působení na vzorek je čistě mechanického rázu. Po povrchu vzorku laminárně stéká uniformní vrstva vody, jejíž funkce je dočasné uvěznění vzniklého rozpínajícího se plazmatu na povrchu vzorku. Dopadající laserový paprsek je fokusován čočkou, projde vodní vrstvou a odpaří malou část absorpční vrstvy (obr. 2a). Vznikne rapidně se rozpínající plazma, které absorbuje zbytek energie pulzu. Plošná hustota výkonu se přitom pohybuje od 1 do 10 GW/cm<sup>2</sup>. Při rozpínání plazmatu vzniká rázová vlna, která se šíří materiálem (obr. 2b). Pokud je tlak dostatečný, dojde k překročení elastického limitu materiálu a v místě dopadu pulzu vznikne lokální plastická deformace. To má za následek vznik tlakových zbytkových napětí sahající do hloubky větší než 1 mm. K rovnoměrnému ovlivnění větší plochy se ovlivňovaný vzorek vůči laseru posouvá a jednotlivé pulzy se tak skládají vedle sebe v předem definovaném vzoru s nenulovým překryvem. Strategie ovlivnění má vliv na rozložení zbytkových napětí.

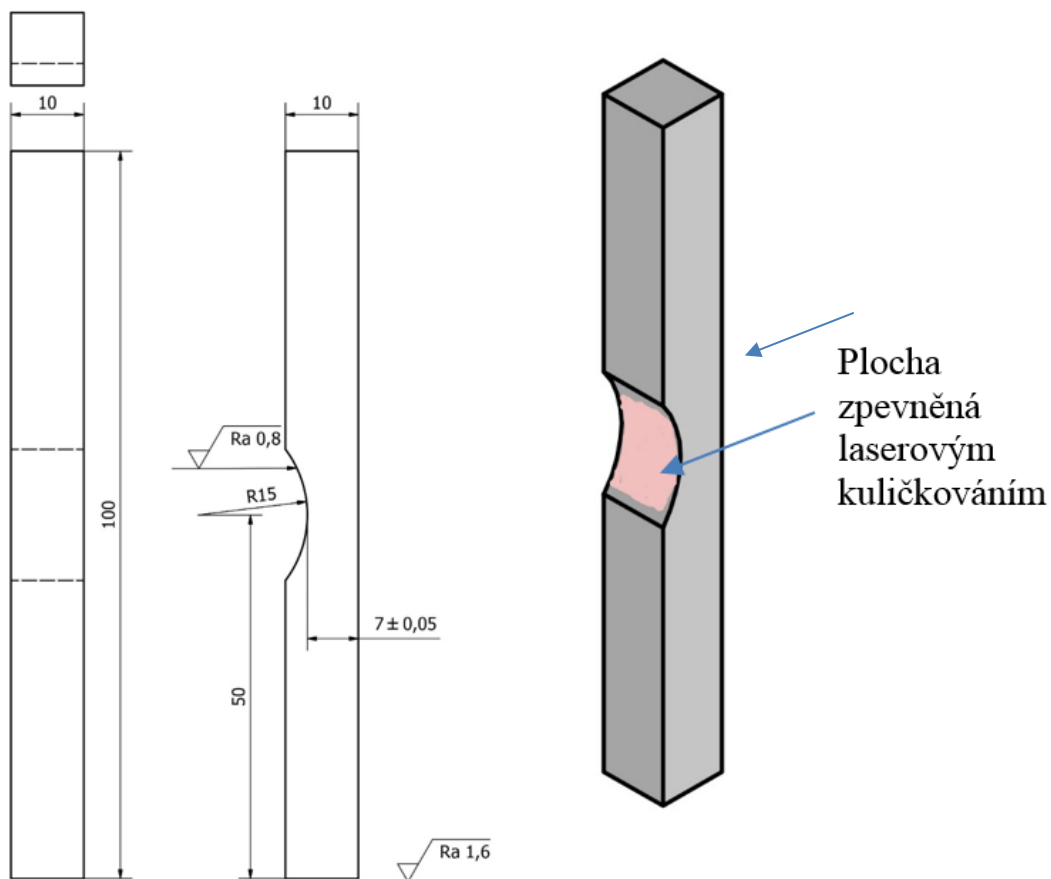


Obr. 2: Zjednodušené schéma LSP procesu

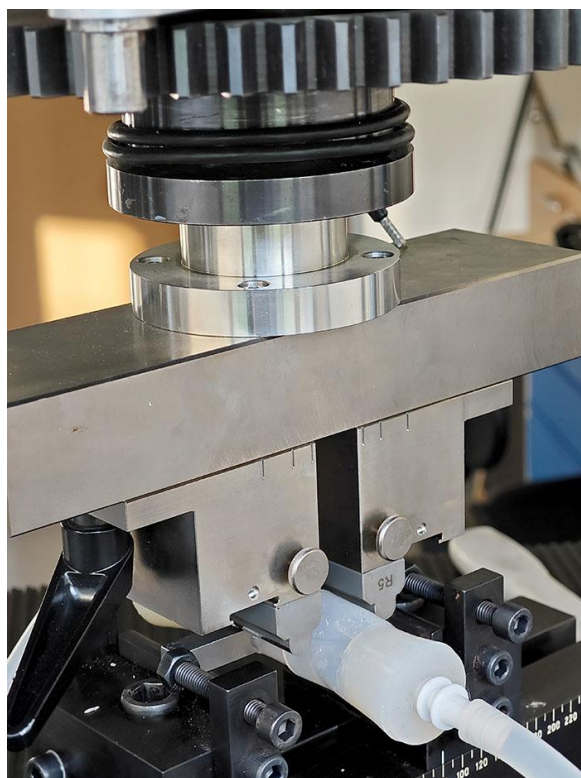
V této práci bylo zpracování experimentálních vzorků technologií LSP provedeno pomocí diodově čerpaného pevnolátkového laseru s vlnovou délkou 1030 nm, se čtvercovým tvarem svazku 2,5 x 2,5 mm, s pulzy o frekvenci 10 Hz. Byla použita ablační vrstva v podobě černé vinylové pásky o tloušťce 100 μm a laminární film (~1 mm) proudící vody. Byly použity dvě strategie kuličkování: jedna vrstva s hustotou výkonu 8 GW/cm<sup>2</sup> a dvě vrstvy s hustotou výkonu 6 GW/cm<sup>2</sup>.

### Zkoušky vysokocyklové únavové pevnosti

Zkoušky vysokocyklické únavové pevnosti v čtyřbodovém ohybu byly provedeny na elektromagnetickém pulzátoru Rumul 250 kN na zkušebních tělesech ve tvaru hranolů 10 x 10 x 100 mm s mělkým konstrukčním vrubem o poloměru 15 mm uprostřed vzorku, který byl při zkoušce únavy orientován ve směru působící síly – obr. 3. Vzdálenost podpěr činila 80 mm, vzdálenost zatěžovacích válečků 40 mm, frekvence zatěžování byla 50 Hz. K vyhodnocení účinnosti peenování byly připraveny tři série zkušebních těles po 6 vzorcích, první skupinu tvořily vzorky bez peenování, v případě peenovaných vzorků ve druhé a třetí sérii byl povrch vrubu zpevněn rázovou vlnou za podmínek dvou různých strategií kuličkování – viz předchozí odstavec. Při zkoušce únavy byla pracovní část zkušebních těles trvale exponována v proudě vody s obsahem chloridu sodného 0,5 g/l a temperované na 15 °C - obr. 4.

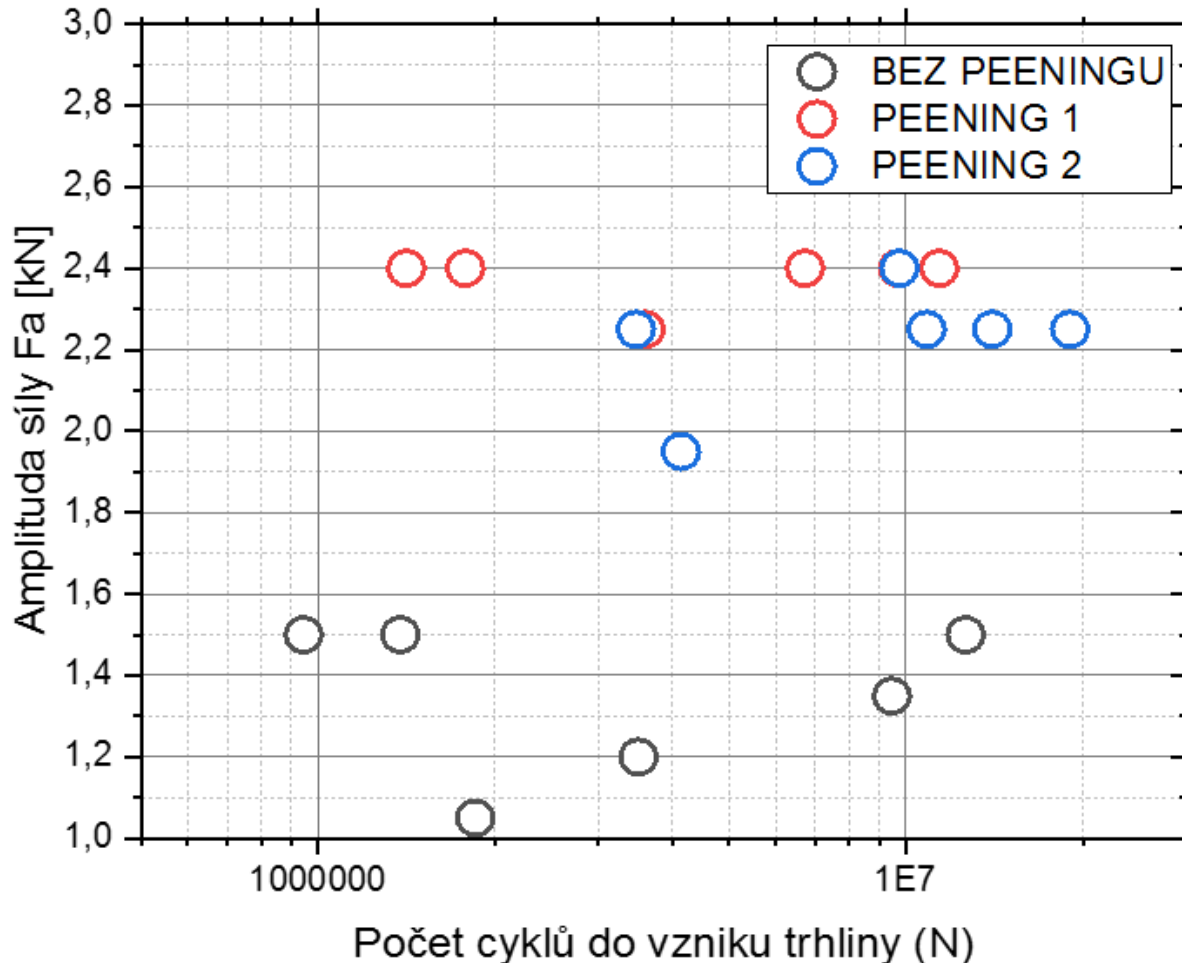


Obr. 3: Zkušební tělesa pro zkoušky únavy při zatěžování v čtyřbodovém ohybu



Obr. 4: Detail pracovního prostoru s přípravkem na zkoušky únavy v čtyřbodovém ohybu v proudící vodě

Zkušební vzorky byly nejprve zatíženy statickou silou – 2,62 kN. Na statickou sílu bylo následně superponováno zatížení dynamické: s počáteční amplitudou síly 1 kN. Pokud nedošlo do  $2 \times 10^7$  zátěžných cyklů k porušení zkušebního tělesa, byla amplituda postupně zvyšována až do vzniku viditelné trhliny ve vzorku. Vyhodnocení únavových testů bylo provedeno na základě stanovení amplitudy síly, která způsobila vznik a šíření trhliny viz graf na obr. 5.



Obr. 5: Amplituda síly nutná pro iniciaci a šíření korozně-únavových trhlin

### Závěr

Na základě měření únavy ve čtyřbodovém ohybu byl prokázán výrazný pozitivní vliv zpevnění povrchu oceli COR 13/4 technikou laser shot peening na odolnost proti porušování mechanismem korozní únavy. Modifikace povrchu měla za následek, že pro iniciaci a šíření trhlin bylo nutné cca o 50 % vyšší dynamické namáhání než v případě neošetřených vzorků.

Varianta zpevnění povrchu spojená s vyšší energií v pulzu se v tomto smyslu jeví jako lepší postup než dvě po sobě provedená ošetření povrchu ale s nižší energií.

U peenovaných vzorků nebyly pozorovány žádné náznaky snížené korozní odolnosti ve vodě.

V současné době probíhá podrobná fraktografie lomů zkušebních těles, zaměřená jednak na studium chování podpovrchových defektů v materiálu s vneseným tlakovým zbytkovým napětím a na stabilitu reformovaného austenitu ve smyslu jeho možné transformace na martenzit vlivem velké deformace působené rázovou vlnou.

Technologie laser shot peening, za předpokladu, že se vyřeší problémy s mobilitou zařízení, ať už na bázi výkonných světlovodných kabelů nebo jiných optických prvků, se jeví jako velmi perspektivní pro zvyšování životnosti dynamicky namáhaných komponent vodních turbín.

## Poděkování

Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

## Literatura

- [1] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, FULÍN, Zdeněk a CHOCHOLOUŠEK, Michal. Korozně únavové vlastnosti oceli COR 13/4 pro komponenty vodních turbín. In: *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. online: Západočeská univerzita v Plzni, 2020, s. 119-124. ISBN 978-80-261-0959-4.
- [2] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk a FULÍN, Zdeněk. Korozně-únavové vlastnosti oceli 13%Cr4%Ni pro komponenty parních turbín. In: *14. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2019, s. 109-114. ISBN 978-80-261-0885-6.
- [3] STREJCIUS, Josef, FULÍN, Zdeněk, CHOCHOLOUŠEK Michal a ŠPIRIT, Zbyněk. Kinetika růstu korozně-únavových trhlin v oceli COR 13/4 pro oběžná kola vodních turbín. In: *16. konference Životnost komponent energetických zařízení*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2021, s. 113-118. ISBN 978-80-261-1045-3.
- [4] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, BRICÍN, David a FULÍN, Zdeněk. Korozně-únavové charakteristiky svarových spojů oceli COR13/4. In: *17. konference Životnost komponent energetických zařízení*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2022, s. 57-62. ISBN 978-80-261-1109-2.
- [5] ŠPIRIT, Zbyněk, KAUFMAN, Jan, BRAJER, Jan, STREJCIUS, Josef a CHOCHOLOUŠEK, Michal. Zvýšení únavové životnosti materiálů metodou laser shock peening. In: *14. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2019, s. 171-176. ISBN 978-80-261-0885-6.
- [6] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, BRAJER, Jan a KAUFMAN, Jan. Laser shock peening pro opravu turbínových lopatek poškozených důlkovou korozí. In: *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. on-line: Západočeská univerzita v Plzni, 2020, s. 63-68. ISBN 978-80-261-0959-4.



# SWELDING OF MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF ENERGY DEVICES WITH LASER AND LASER-MIG HYBRID TECHNOLOGY, HYBRID WELDING

## SWELDING OF MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF ENERGY DEVICES WITH LASER AND LASER-MIG HYBRID TECHNOLOGY, HYBRID WELDING

Libor Mrňa <sup>a)</sup>, Hana Šebestová <sup>a)</sup>, Jan Novotný <sup>a)</sup> a David Beran <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Ústav přístrojové techniky AV ČR v.v.i., Královopolská 147, 612 64 Brno

<sup>b)</sup> Siemens Energy, s.r.o., Olomoucká 3419/7, 618 00 Brno

### Abstrakt

Technologie laserového svařování je známá spíše z oblasti automotive, kde se používá pro rychlé a kvalitní svařování tenkých plechů karoserie. Výroba energetických zařízení je specifická jednak používanými materiály (převážně martenzitickými korozivzdornými ocelmi) a jednak i podstatně většími tloušťkami svařenců. Na ÚPT je prováděn výzkum svařitelnosti těchto materiálů pomocí technologie laserového svařování a pomocí hybridní technologie laser-MIG. Článek popisuje zkušenosti jak s obecnou svařitelností těchto materiálů laserem a hybridním laser-MIG, tak i praktické aplikace svařování dílů parních turbín. Konečně je také diskutována možnost navařování stelitů pomocí hybridní technologie laser-MIG.

### Abstract

Laser welding technology is known more from the automotive field, where it is used for fast and high-quality welding of thin body sheets. The production of power equipment is specific both in the materials used (mainly martensitic stainless steels) and in the significantly larger thicknesses of the welds. Research into the weldability of these materials using laser welding technology and laser-MIG hybrid technology is being conducted at the ÚPT. The article describes experiences with the general weldability of these materials with laser and hybrid laser-MIG, as well as practical applications of welding parts of steam turbines. Finally, the possibility of welding stellites using hybrid laser-MIG technology is also discussed.

### Úvod

Technologie laserového svařování je známá spíše z oblasti automotive, kde se používá pro rychlé a kvalitní svařování tenkých plechů karoserie. Výroba energetických zařízení je specifická jednak používanými materiály (převážně martenzitickými korozivzdornými ocelmi) a jednak i podstatně většími tloušťkami svařenců. Martenzitické oceli s obsahem 13 % chromu se dle [1] používají jako korozivzdorné, méně často jako žáruvzdorné do teplot 800-850 °C. Po popuštění na vysoké teplotě mají nižší tvrdost, ale vyšší houževnatost. Svařitelnost dle [2] je podmíněně zaručena (nutný předehřev na cca 200 °C). Je ovšem nutno zdůraznit, že tento výrok platí pro obloukové metody svařování. Protože laserové svařování je po fyzikální stránce odlišné, budou pro něj platit jiné podmínky. Vlivem vysoké intenzity záření vzniká v místě dopadu zaostřeného laserového svazku paroplynová dutina – keyhole. Díky tomu laserový svazek proniká hlouběji do materiálu a výsledný svar vykazuje vyšší štíhlost než při obloukovém svařování. Vlivem vysoké rychlosti svařování je vnášené teplo malé. Malý objem svarové lázně vůči masivu okolního materiálu ale způsobí vysoké rychlosti ochlazování v řádu několika stovek °C/s, což je minimálně 10x vyšší rychlost ochlazování než při obloukovém ohřevu (bylo ověřeno experimentálně pomocí speciálního pyrometru s malým měřeným bodem). Z hlediska mikrostruktury bude výsledkem prakticky vždy martenzit, vždy ale s určitým podílem delta



feritu. Výsledné tvrdosti svarového kovu jsou vysoké. Přesto při všech dále popsaných experimentech nebyly pozorovány trhliny za horka. Vysvětlením může být malý objem svaru vyvolávající zbytkové napětí menší než mez pevnosti materiálu.

### Použité materiály

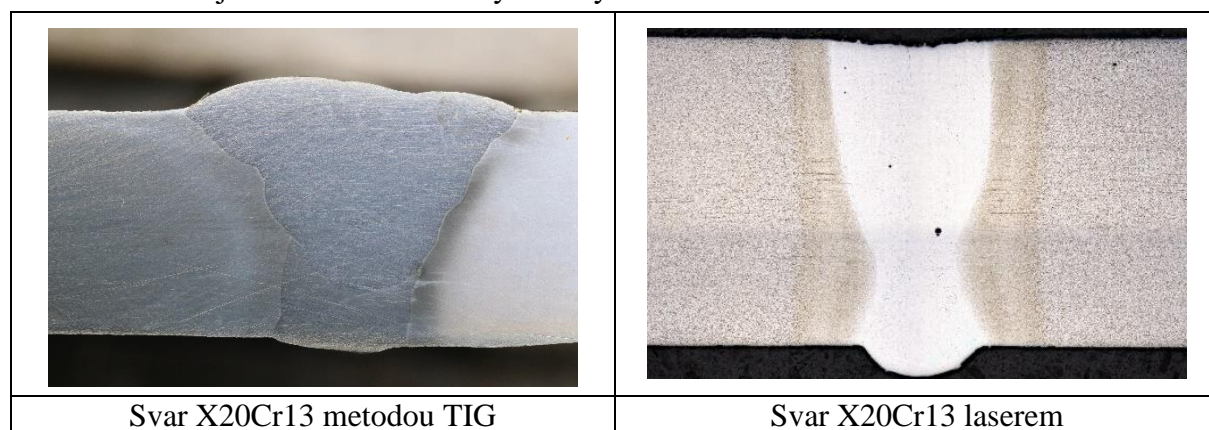
Byly svařovány materiály dle požadavků Siemens Energy X12Cr13, X20Cr13 a pro heterosvary byl použit i materiál S355J2. Pro srovnání byly stejné materiály svařeny metodou TIG, která se aktuálně používá. Tabulka 1 pak uvádí chemické složení plechů měřené optickým emisním spektrometrem Spectrumat GDS 750.

Tab. 1: Chemické složení svařovaných materiálů v hmotnostních procentech (jen prvky s obsahem nad 0,01 %)

materiál, tloušťka	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
S355J2, 6 mm	0,13	1,52	0,02	0,009	0,002	0,00	0,02	0,00	0,00
X12Cr13, 6,4 mm	0,09	0,64	0,39	0,021	0,001	12,5	0,40	0,06	0,04
X20Cr13, 6 mm	0,20	0,76	0,44	0,023	0,002	13,6	0,19	0,02	0,07

Mechanické vlastnosti použitých materiálů jsou zmíněny při svařovacích testech.

Pro srovnání jsou na obr. 1 uvedeny ukázky svarů metodou TIG a laserem.



Svar X20Cr13 metodou TIG

Svar X20Cr13 laserem

Obr. 1: Srovnání velikosti svarů materiálu X20Cr13 tl. 6 mm pro dvě svařovací technologie

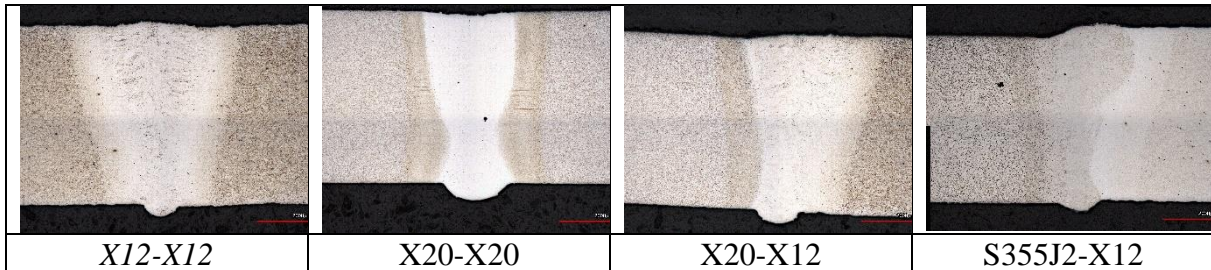
### Experimentální zařízení

Svařovací experimenty na ÚPT byly provedeny s využitím vláknového laseru IPG Photonics YLS2000 s maximálním výkonem 2 kW. Laserový svazek je možno přepínat mezi dvěma optickými vlákny s průměry 100  $\mu\text{m}$  nebo 200  $\mu\text{m}$ . Vždy jedno z vláken je připojeno do svařovací hlavy Precitec YW30 umístěné na rameni robota ABB IRB 2400. Při použití fokusační čočky s ohniskovou vzdáleností 200 mm činí průměr svazku v ohnisku přibližně 0,2 mm při použití vlákna 100  $\mu\text{m}$  a 0,4 mm při použití vlákna 200  $\mu\text{m}$ .

### Laserové svařování

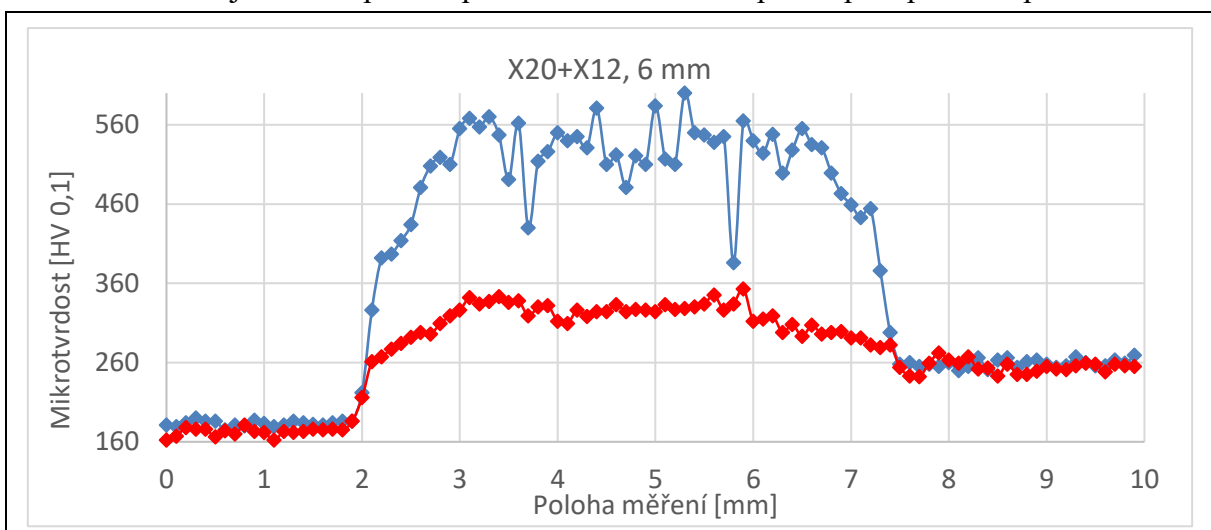
V první fázi byla provedena optimalizace svařovacích parametrů pro danou tloušťku, kdy se používal maximální výkon laseru 2 kW a hledala se svařovací rychlost tak aby došlo k vytvoření potřebného kořene. Při tom bylo zjištěno, že dochází k výraznému pórování. Toto je způsobeno nestabilitou keyhole, kdy dochází k jejímu náhodnému zaškrcování spodní části – vznikne uzavřená dutina – pór. Ten pak nestačí uniknout svarovou lázní a zůstane uvězněn ve svarovém kovu. Pro odstranění bylo zjištěno, že pomůže vhodné nastavení průtoku argonu jako ochranné atmosféry. Svařovalo se v poloze PA.

Byly provedeny svary jak všech základních materiálů, tak tyto materiály mezi sebou (heterogenní svary). Při svařování bylo zjištěno, že není potřeba aplikovat předeheřev, oproti stávajícímu svařování metodou TIG. Tvrdost po svaření ovšem přesahovala 600 HV, proto bylo aplikováno žihání (600 °C po dobu jedné hodiny s následným pozvolným dochládnutím na teplotu okolí). Po žihání klesly tvrdosti na akceptovatelných cca 330 HV.



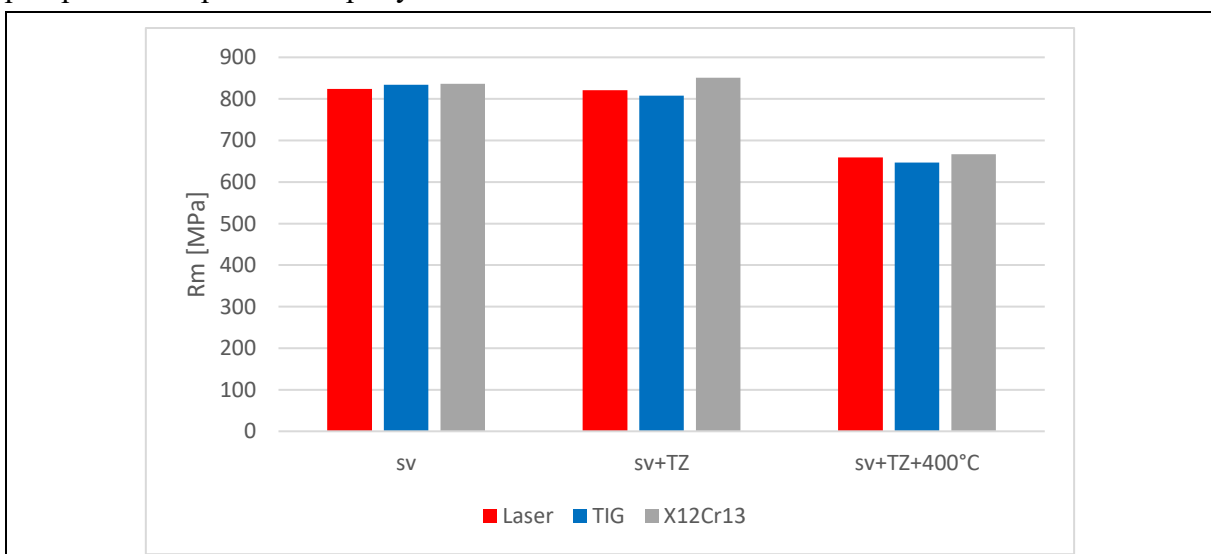
Obr. 2: Makrofotografie svarů

Dále na obr. 3 je uveden příklad průběhu mikrotvrdosti před a po tepelném zpracování.



Obr. 3: Průběh mikrotvrdosti pro laserem provedený heterosvar X12Cr13-X20Cr13 po svaření a po TZ

Na obr. 4 je pak uveden příklad výsledků tahové zkoušky pro jednu kombinaci materiálů pro technologii laser, TIG a základní materiál vždy po svaření, po tepelném zpracování a poté za předpokládané provozní teploty 400 °C.

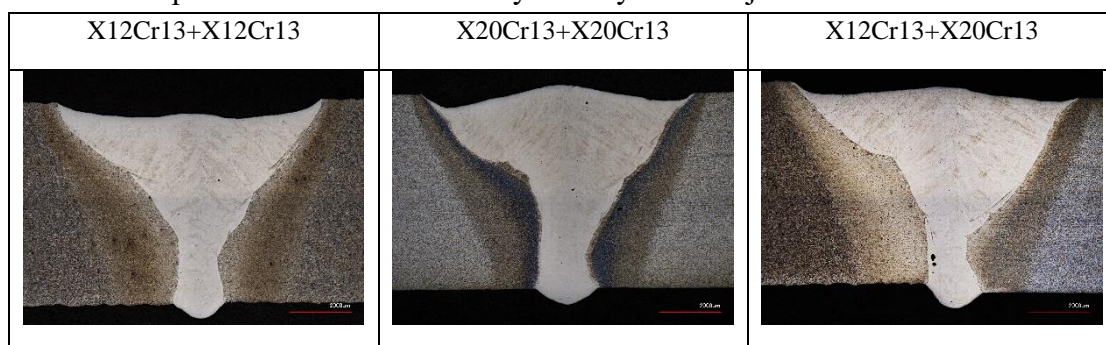


Obr. 4: Výsledky tahové zkoušky pro svar X12Cr13-X12Cr13 svaření, po tepelném zpracování a za provozní teploty 400 °C

Závěrem lze konstatovat, že laserem vytvořené svary mají srovnatelné vlastnosti jako svary vytvořené metodou TIG, ale není potřebný předehřev, nejsou potřebné velké přídavky na dodatečné opracování a rychlost svařování je na 1 m cca 10x vyšší.

### Hybridní svařování

V předchozím odstavci bylo předvedeno, jakým způsobem může být užitečné laserové svařování materiálů pro energetiku. Mohou však nastat i situace, kdy je potřeba přidat dodatečný materiál (například přechodový materiál pro heterosvary). Tohoto požadavku lze dosáhnout např. technologií studeného drátu, kdy laserový svazek taví přidávaný drát i povrch svařovaného dílce. Tuto technologii lze použít pouze pro tenké materiály. Podstatou hybridní technologie laser-MIG je současné působení laserového svazku a obloukové metody MIG do jedné svarové lázně. Hlavní role laserového svazku spočívá ve vytváření hloubkového průvaru v penetračním režimu. Přídavný materiál v podobě drátu tavený v MIG hořáku zajistí doplnění potřebného množství roztaveného kovu do svarové lázně pro dosažení požadovaných rozměrů svaru. Synergickou výhodou hybridního svařování je dosahování vysokých svařovacích rychlostí odpovídajících laserovému svařování a současně regulovatelný přísun přídavného materiálu zajišťovaný procesem MAG pro zajištění požadovaných rozměrů a parametrů svaru. Na druhé straně může docházet k problémům souvisejícím s hloubkovou heterogenitou svaru související s odlišností obou technologií: spodní část svaru je čistý metalurgický spoj obou materiálů, v horní části jde o MIG svar, který může mít více či méně odlišný přídavný materiál (z hlediska chemického složení, mikrostruktury a mechanických vlastností). Na ÚPT byla zkonstruována experimentální hybridní svařovací hlava obsahující laserovou svařovací hlavu umožňující změnu průměru laserového svazku, dále hořák MIG s držákem pro jeho polohování vzhledem k ose laserového svazku a jeho výšku nad materiálem. Jako zdroj MIG je použit Fronius TPSi 320 s příslušnými komponenty. Tato hardwarová sestava je doplněna systémovou integrací všech komponent do řídicího systému robota, aby bylo umožněno nastavovat jak výkon laseru, tak i job parametry zdroje MIG přes rozhraní robota a také bylo umožněno synchronní spouštění obou svařovacích zdrojů. Pro svařování MIG se používá režim PMC, což je pulzní přenos kovu s možností regulace hloubky závaru a délky oblouku vyvinutý Froniem. Touto technologií byly opět svařeny žárupevné martenzitické oceli X12Cr13 (6,6 mm) a X20Cr13 (6,3 mm). Svarové plochy byly obrobeny pro dosažení úkosu 45° při 4 mm otupení. Byly provedeny homogenní svary i svary kombinující oba materiály. Svařovací rychlost 13 mm·s<sup>-1</sup> se ukázala jako nevhodná – svary byly dle RTG zkoušky nevyhovující pro nadměrnou pórovitost. Až zvýšení rychlosti na 30 mm·s<sup>-1</sup> se ukázalo jako optimální. Série byla svařena laserem IPG YLS 2000 fokusovaným svazkem s výkonem 1500 W. Svářečka Fronius TPS 320i PULSE pracovala v režimu PMC. Svařovací proud byl 180 A. Přídavný materiál EC410NiMo (mod.) o průměru 1,2 mm byl podáván rychlostí 7 m·min<sup>-1</sup>. Svařování probíhalo v ochranné atmosféře 96 % Ar + 3 % CO<sub>2</sub> + 1 % H<sub>2</sub> o průtoku 15 l·min<sup>-1</sup>. Příklady některých svarů jsou na obr. 5.



Obr. 5: Makrofotografie hybridních svarů

Byly provedeny potřebné tahové zkoušky a měření mikrotvrdoosti, které prokázaly vyhovující kvalitu svaru. Kromě toho byla provedena chemická analýza svarového kovu metodou EDS, která prokázala, že přídavný materiál si díky technologii s rozšířeným svazkem dostal až do spodní části svaru, svarový kov je tedy více homogenní v celém průřezu, viz tabulka 2.

Tab. 2: Výsledky EDS analýzy svarového kovu

		Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
<b>410NiMo</b>			<0,25	0,9	0,7	12,0	4,6	0,6
<b>X12Cr13+X12Cr13</b>	hlava	78,72	3,27	1,22	0,55	13,95	2,04	0,25
	kořen	79,49	2,94	1,06	0,44	13,83	2,13	0,11
	rozdíly	1%	-10%	-13%	-20%	-1%	4%	-56%
<b>X20Cr13+X20Cr13</b>	hlava	79,35	3,26	1,05	0,47	14,15	1,63	0,08
	kořen	79,13	3,33	1,08	0,48	13,95	1,91	0,12
	rozdíly	0%	2%	3%	2%	-1%	17%	50%
<b>X12CR13+X20Cr13</b>	hlava	80,26	1,22	1,57	0,39	14,24	2,31	0
	kořen	79,58	1,51	1,59	0,48	14,43	2,32	0,09
	rozdíly	-1%	24%	1%	23%	1%	0%	-

Pro svařovací postupy byly vypracovány příslušné WPQR a WPS. Z technologického pohledu se hybridní svařování laser-MIG s rozšířeným svazkem se jeví jako slibná metoda tam, kde je potřeba zajistit výškovou chemickou homogenitu svaru z hlediska rozložení prvků. Navíc proti metodám MIG či TIG dosahuje vyšších svařovacích rychlostí a v závislosti na výkonu laseru dokáže provést kompletní průvar materiálu na méně průchodů – je tedy i ekonomicky efektivnější. Samozřejmě vše záleží na optimalizaci všech procesních parametrů, což nemusí být zcela jednoduchá záležitost.

### Hybridní navařování

Aktuálně probíhají studie pro využití výše uvedené svařovací technologie i pro návary zušlechťujících materiálů. V principu jde o ohřev či natavení povrchu základního materiálu pomocí laseru a následné nanesení zušlechťujícího materiálu z drátu taveného některou formou pokročilého elektrického oblouku zajišťující malý vnos tepla (např. CMT, CMT+Cycle step a další – režimy zdrojů firmy Fronius). Cílem je dosažení kvalitního návaru s vysokou nanášecí rychlostí, malým zředěním a s výhodou relativně nízké ceny drátu navařovaného materiálu.

### Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu TA ČR: FW01010293 Využití laserových a hybridních technologií v energetických zařízeních.

### Literatura

- [1] FREMUNT, Přemysl a PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [2] Datasheet X12Cr.13 (1.4006), Datasheet X20Cr13 (1.4021).
- [3] ZHAN, X. et al. Comparison between hybrid laser-MIG welding and MIG welding for the invar36 alloy. *Optics and laser technology*, November 2016, vol. 85, p. 75-84, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.06.001>
- [4] CUI, L. et al. Joining 6 mm thick dissimilar steel/Al alloy butt joints using two keyhole laser-MIG hybrid welding processes. *Journal of Laser Applications*, August 2018, vol. 30, no. 3, paper 032418, <https://doi.org/10.2351/1.5040649>





# METODY PHASED ARRAY ULTRAZVUKU V ENERGETICE

## PHASED ARRAY ULTRASONIC METHODS IN THE POWER INDUSTRY

Stanislav Štarman

STARMANS electronics, s.r.o., V zahradách 836/24, Praha 8

### Abstrakt

Příspěvek informuje o možnostech zkoušení přístrojem DIO1000, který kombinuje zkoušení klasickými ultrazvukovými sondami, sondami EMAT a Phased Array sondami. Příspěvek se zaměřuje na měření útlumu zkoušeného materiálu, měření kompozitových materiálů a uvádí základní členění metod, které je možné s přístrojem realizovat.

### Abstract

The paper informs about the testing capabilities of the DIO1000, which combines testing with conventional ultrasonic probes, EMAT probes, and Phased Array probes. The paper focuses on the measurement of the attenuation of the material under test, the measurement of composite materials and provides a basic classification of the methods that can be implemented with the equipment.

### Úvod

Pro zkoušení ultrazvukem je útlum materiálu velmi důležitým faktorem pro volbu správné metody, správného rozsahu zkušebních frekvencí a volby vazebního prostředku. Měření útlumu je možné provádět stejným přístrojem DIO1000, kterým provádíme měření. Dále jsou zmíněny aplikace, které jsou používány v oblasti energetiky.

### 1. Útlum ultrazvuku ve zkoušeném prostředí

Prochází-li vlna prostředím, dochází k jejímu útlumu, a to vlivem:

- absorpce, při níž dochází k pohlcování energie vnitřním třením a elasticou hysterezí a následnou přeměnou ultrazvukové energie na jiné druhy energie (obvykle na tepelnou),
- rozptylu, při němž dochází k odrazu ve struktuře materiálu (zrna, póry, fázové změny v kovu) k difrakci (tj. ohybu vlnového pole) a k lomu ve směru šíření vlny na rozhraní,
- divergence (tj. rozbíhavosti tvaru pole) a disperze způsobené různou rychlostí šíření vlny dle jejího módu a frekvence.

Pro pokles amplitudy akustického tlaku je definován koeficient útlumu  $\alpha$ , ze vztahu

$$p_{Ax} = p_{A0}e^{-\alpha x}. \quad (1)$$

Z rovnice vyplývá pro koeficient útlumu rozměr (Np/m). Místo jednotky Neper (Np) se používá decibel (dB). Pro přepočítání jednotek platí  $1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$ ,  $1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$ .

Pozn: Neper je bezrozměrná jednotka, která se používá pro vyjádření poměru dvou hodnot. Rovná se přirozenému logaritmu podílu dvou porovnávaných hodnot jedné veličiny neboli

$$\text{Np} = \ln(x_1/x_2). \quad (2)$$

Pochopení fyzikální podstaty útlumu v materiálu je podstatné pro optimalizaci frekvence z hlediska odstupů signálu od šumu (poměr signál/šum), a tím i pro stanovení minimálního rozměru detekovatelné vady v souvislosti s hloubkou vady od povrchu. Pro strukturu tuhých



látek, jako jsou nehomogenní, polykrystalické, hrubozrnné tvrdé slitiny s anizotropní strukturou a podobné materiály, je koeficient útlumu dán součtem útlumu absorpcí (pohlčováním)  $\alpha_p$  a útlumu rozptylem  $\alpha_r$  tj.

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r. \quad (3)$$

Útlum  $\alpha_p$  je způsobený absorpcí vnitřním třením a při vyšších frekvencích elastickou hysterezi, přičemž se mechanická energie mění na teplo. Tato složka útlumu je přímo úměrná frekvenci

$$\alpha_p = C_p \cdot f. \quad (4)$$

Koeficient útlumu způsobený rozptylem závisí jednak na střední velikost nehomogenity v materiálu  $\bar{D}$  a jednak na kmitočtu. Tuto závislost lze stanovit pro tři oblasti:

a) Rayleighovu oblast pro vlnovou délku  $\lambda \gg \pi\bar{D}$ , kde platí

$$\alpha_r = C_1 \bar{D}^3 f^4, \quad (5)$$

b) stochastickou oblast pro vlnovou délku  $\lambda \cong \pi\bar{D}$ , kde platí

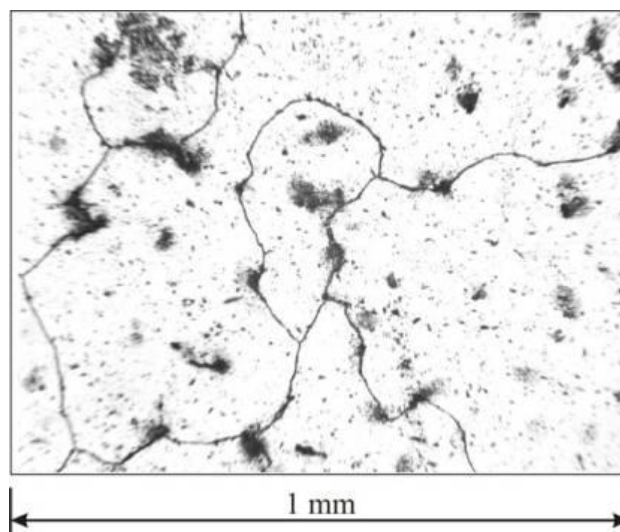
$$\alpha_r = C_2 \bar{D} f^2, \quad (6)$$

c) difúzní oblast pro vlnovou délku  $\lambda \ll \pi\bar{D}$ , kde platí

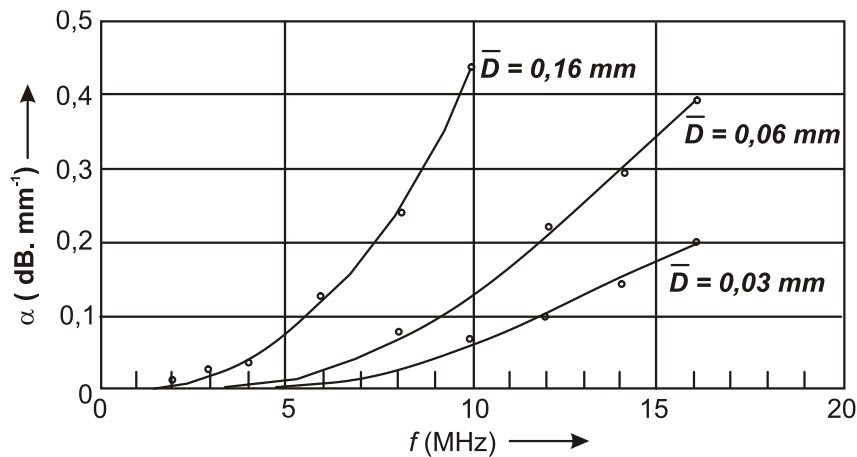
$$\alpha_r = C_3 \bar{D}^{-1}. \quad (7)$$

Hodnoty konstant  $C_p$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  jsou zjištěné experimentálně a závisí na zrnitosti (viz obr. 1), geometrické anizotropii, elastické anizotropii, hustotě, typu vlny (podélná, příčná).

Nízká frekvence  $f$  vlny, tj. velká vlnová délka  $\lambda$  ( $c = f \cdot \lambda$ ) má ale za následek velkou hodnotu divergenčního úhlu ultrazvukového svazku sondy a za předpokladu  $\lambda > \bar{D}$  (kde  $\bar{D}$  je střední velikost nehomogenity v materiálu) dochází k malému rozptylu, ale současně získáme malou citlivost a rozlišitelnost při detekci vad. Vysoká hodnota frekvence, a tedy malá vlnová délka má za následek malý divergenční úhel sondy a při  $\lambda < \bar{D}$  nebo  $\lambda \approx \bar{D}$  velký rozptyl. Z uvedeného je zřejmé, že je nutné při volbě frekvence vždy volit kompromis. Příklad závislosti na frekvenci a zrnu je na obr. 2.



Obr. 1: Zrnitost hrubozrnného materiálu



Obr. 2: Závislost útlumu na frekvenci a velikosti zrna u uhlíkaté oceli

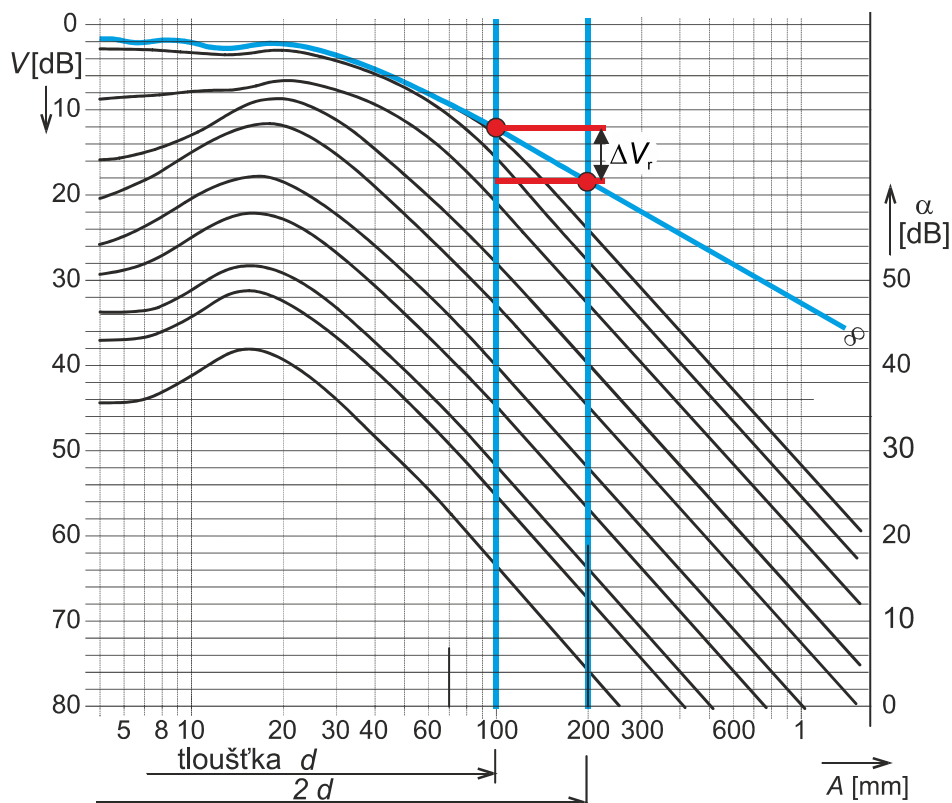
### 1.1 Měření koeficientu útlumu

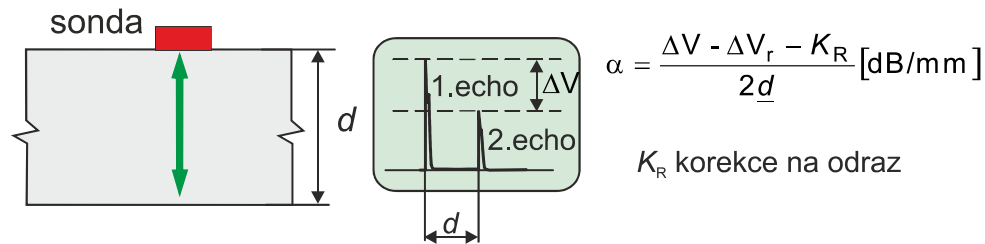
Přesné měření útlumu je obtížné z důvodů jako je difrakce, rozptyl a divergence ultrazvukového paprsku. Metody korigující tyto chyby měření by překročily rozsah tohoto článku.

Pro měření koeficientu útlumu existují dvě možnosti:

- odrazová (relativní) metoda,
- průchodová (absolutní) metoda.

**Odrazová metoda** vyhodnocení součinitele útlumu je realizována na vzorku materiálu s paralelními povrchy podélnou vlnou, klasickou odrazovou impulzovou metodou s A – zobrazením.





Obr. 3: Měření koeficientu útlumu s využitím AVG diagramu

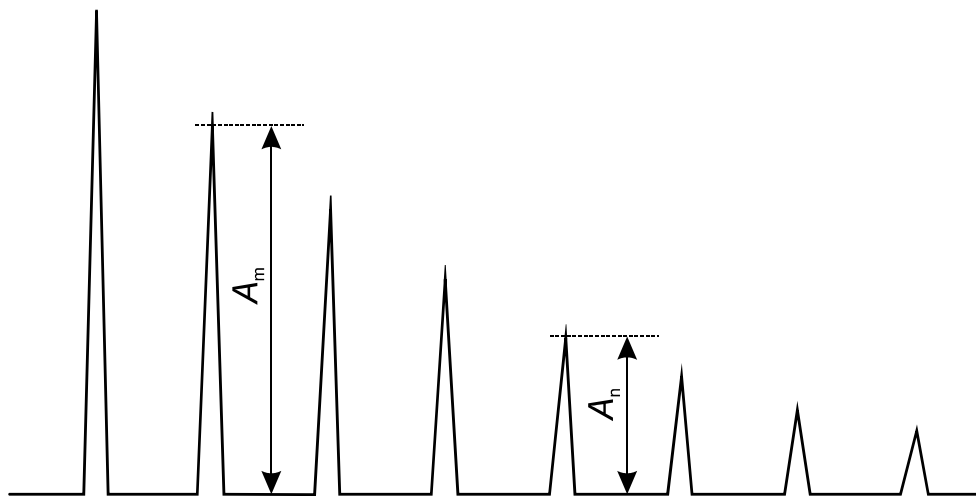
Korekce  $K_R$  udává činitel odrazu mezi sondou a vzorkem a je závislá na stavu povrchu, vazební vrstvě a struktuře materiálu vzorku. U kovových materiálů bývá  $K_R$  kolem  $-1$  dB, u nekovových podstatně méně. Přesně lze hodnotu  $K_R$  stanovit na dvou vzorcích, jejichž tloušťky jsou v poměru 1 : 2. Poměr koncových ech je hodnota  $K_R$ .

### 1.2 Měření koeficientu útlumu dle normy ASTM E664-93

Útlum je vyhodnocován prostřednictvím vícenásobných koncových ech při podélném vlnění v imerzní vaně s vodou. Rovnoběžnost planoparalelních stěn je nutná s průměrnou odchylkou 0,2 mm na 25,4 mm. Hodnotu koeficientu útlumu stanovíme dle obr. 4. zobrazení pro vyhodnocení koeficientu útlumu ze vztahu

$$\alpha = \frac{20 \log_{10} \frac{A_m}{A_n}}{2(n-m)T}, \quad (8)$$

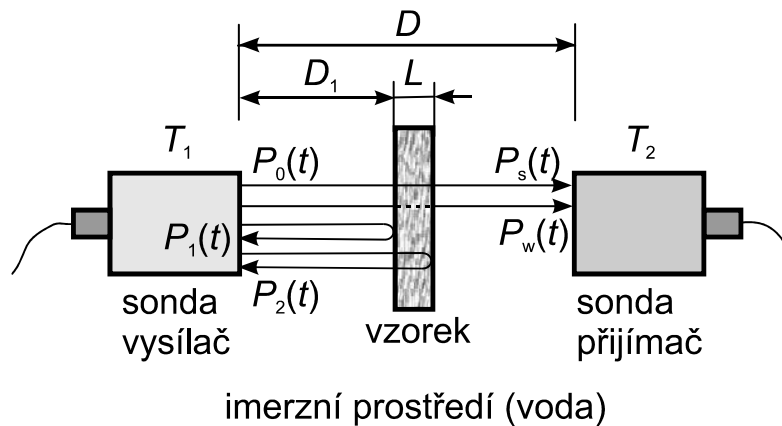
kde  $A_m, A_n$  jsou amplitudy  $m$ tého,  $n$ tého koncového echa ( $n > m$ ) dle obr. 4. T je tloušťka měřeného vzorku.



Obr. 4: Zobrazení pro vyhodnocení koeficientu útlumu

### 1.3 Měření koeficientu útlumu průchodovou absolutní metodou

**Průchodové (absolutní) metody** jsou obvykle založeny na impulzové průchodové metodě s kontaktní nebo bezkontaktní vazbou, včetně metod využívajících elektromagnetické měniče EMAT. Využití je např. pro partikulární kompozity. Metody vyžadují speciální měřicí uspořádání a speciální programové vybavení pro korekce chyb.



Obr. 5: Průchodová metoda měření útlumu

$P_1(t)$  a  $P_2(t)$  representují impulsní signály odražené od předního a zadního vzorku,  $P_s(t)$  a  $P_w(t)$  reprezentují signály se vzorkem nebo bez vzorku v imersním prostředí. Fourierovou transformací  $U_i(f) = A_i e^{-j\theta_i(f)}$  signálu impulsu  $P_i(t)$  získáme amplitudové spektrum  $A_i(f)$ . Pro impulsy  $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_w(t), P_s(t)$  platí:

$$\begin{aligned}
 U_1(f) &= |A_1(f)| e^{-j\theta_1(f)}, \\
 U_2(f) &= |A_2(f)| e^{-j\theta_2(f)}, \\
 U_w(f) &= |A_w(f)| e^{-j\theta_w(f)}, \\
 U_s(f) &= |A_s(f)| e^{-j\theta_s(f)}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Koeficient útlumu je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{1}{L} \left[ \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) - \ln \left( \frac{A_w}{A_s} \right) \right]. \tag{10}$$

Metoda absolutní pro měření útlumu je přesná, vhodná pro laboratorní měření, v praxi málokdy máme k dispozici přístup k materiálu z obou stran pro průchodovou metodu.

## 2. Verze přístrojů DIO1000

Verze přístrojů se liší aplikační oblastí, všechny verze přístrojů mají jednotný SW i HW, připojují se k nim jiné typy sond.

Tab. 1: Verze přístrojů a jejich aplikace pro energetiku, průmysl a dopravu

Verze přístroje	Frekvenční rozsah	Aplikace
DIO1000-LF	20 kHz-400 kHz	Zkoušení betonů, železobetonových konstrukcí, měření materiálových konstant betonu a kompozitů a látek s vysokým útlumem. Sondy fungující na principu přitlaku bez imerze
DIO1000-SF-EMAT	400 kHz – 30 MHz	Standartní UZ zkoušení, svary, vnitřní vady, povrchové vady, tloušťky, koroze,

		metoda EMAT bez imerse pro měření tloušťky trubek	
DIO1000-2CH	400 kHz – 30 MHz	Dvoukanálová verze – měří současně pomocí dvou UZ sond, má zcela nezávislé obrazovky a nastavení. (Použití – přímá sonda současně s úhlovou sondou, dvě úhlové sondy pro zkoušení dvěma směry při jednom pohybu)	
DIO1000-PA	500 kHz-30 MHz	PA zkoušení při použití SSCAN. LSCAN, BSCAN, kontaktně, s použitím klínů, válcové sondy, skenery pro poloautomatizovaný záznam	

### 3. Měření hloubky zakalení

Moderní pevnostní výrobky – např. svorníky (z jiného oboru např. železniční nápravy) potřebují zakalení do hloubky, která je nastavena procesem vysokofrekvenčního ohřevu.

Není však tak jednoduché bez rozříznutí a destruktivní kontroly provádět zkoušku nedestruktivně.

Na obr. 6 je viditelná tmavá část povrchu, která je zakalena po vyříznutí vzorku z nápravy. Protože jde o rozhraní mezi zakalenou a nezakalenou vrstvou, která navíc není rovnoběžná je nutno použít vysoké frekvence a miniaturní Phased Array sondy.

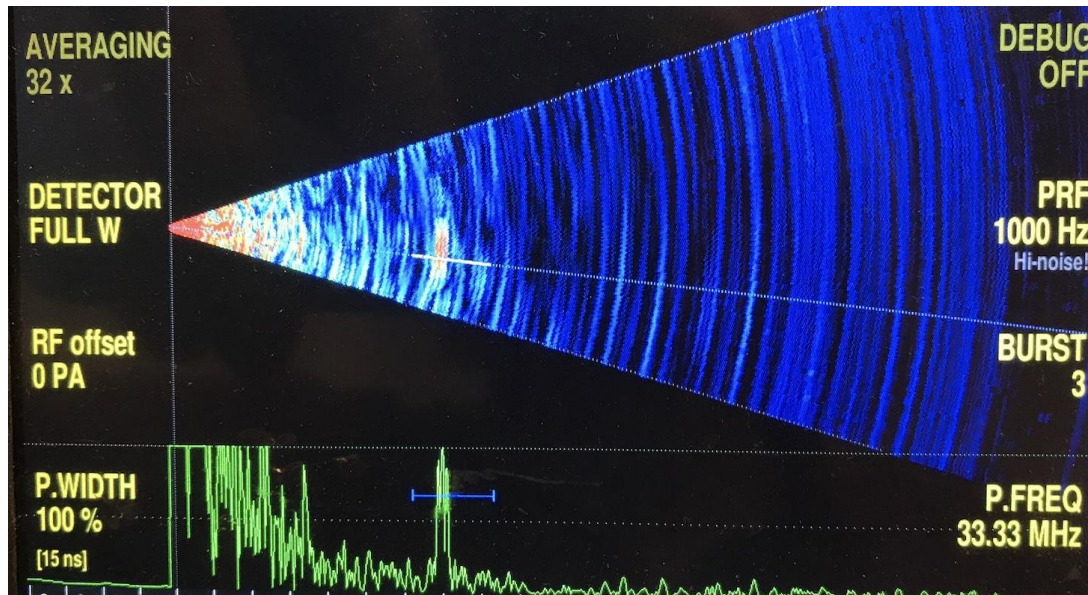
Při této zkoušce byla použita dávka pulsů 33 MHz, nižší frekvence nedávaly viditelný odraz od rozhraní.

Na následujícím obr. 7 vidíme odraz od rozhraní, nejedná se o žádné vnitřní vady v materiálu nápravy. Při skenování podél nápravy není v celém průběhu tento odraz viditelný, tak praktické nasazení této metody žádá další výzkum.



Obr. 6: Vzorek s hloubkovým zakalením – zakalení má tmavou barvu





Obr. 7: Zobrazení od přechodu změněné struktury v místě, kde končí zakalení

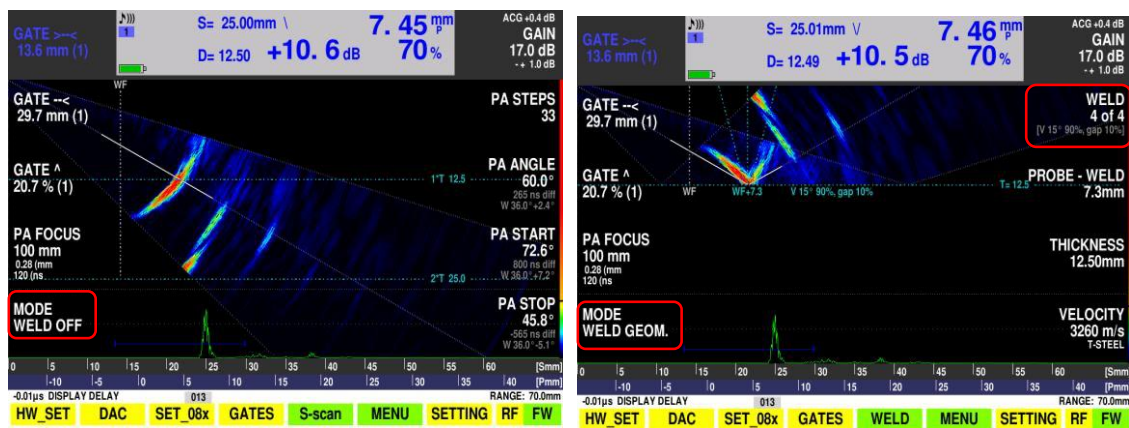
#### 4. Měření s manažerem svaru při neznámé tloušťce

Při měření svarů často nemáme k dispozici přesnou geometrii a výkres, jak svar vypadá. To způsobí chyby zobrazení v případě odečítání hloubky s následnými odrazy.

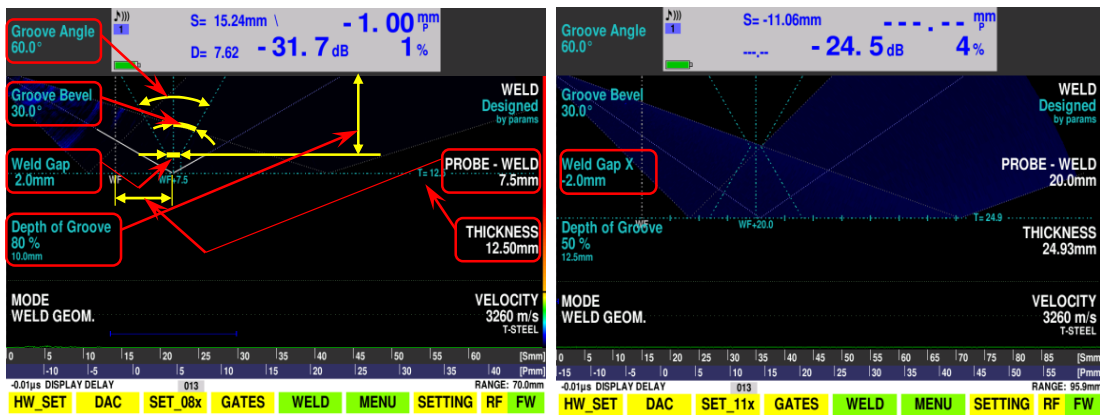
ONLINE manažer umožňuje provádět korekce nastavení na reálném svaru. Když neznáme přesnou tloušťku a nejde ji změřit, vidíme stín odrazu od spodní plochy a můžeme dokorigovat nastavení profilu svaru dle skutečnosti. Všechny parametry je možné seřizovat pomocí tlačítek najednou v reálném čase.

Tloušťku svaru nastavujeme tak, aby první odraz byl v místě dna svaru. Pak můžeme dokorigovat typ svaru pomocí parametrů manažeru.

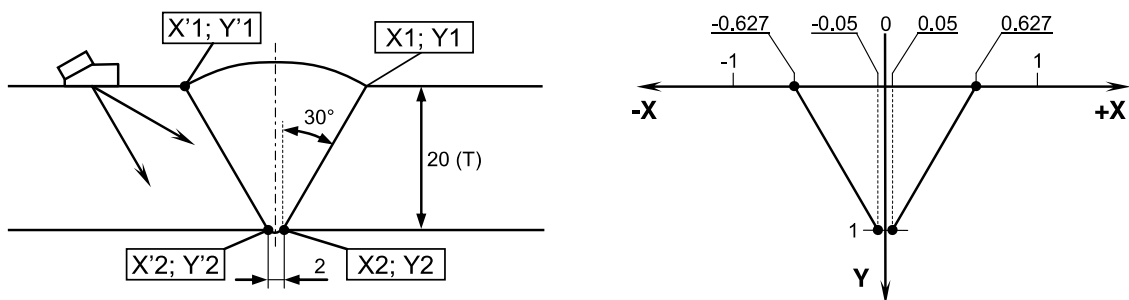
Tvary svaru je také možné vytvořit v softwaru MS.Excel a nahrát do přístroje, pak to ovšem přijde o možnost interaktivního seřízení.



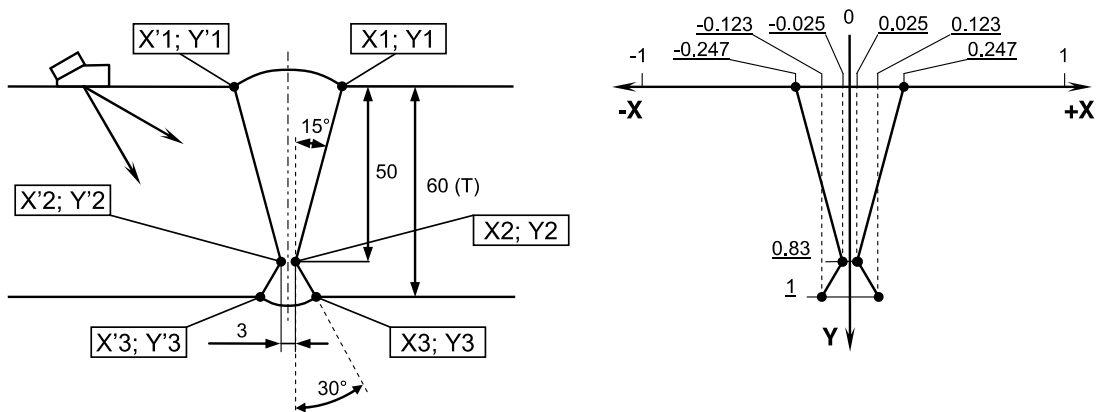
Obr. 8: Zobrazení paprsku s vypnutým manažerem svaru a zapnutým vpravo (podle zadané tloušťky se zobrazené paprsky zrcadlí od dna svaru)



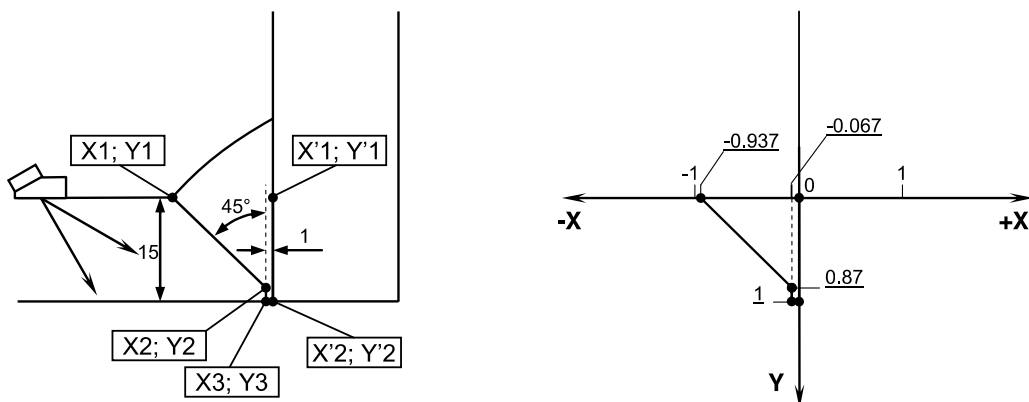
Obr. 9: Zobrazení menu – parametry manažeru, které je možné online při seřizování měnit



Obr. 10: Příklad zobrazení svaru V, kde je úhel svaru jen z horní strany



Obr. 11: Příklad zobrazení svaru X, kde je horní úhel 15°, dolní úhel 30°. Toho docílíme nastavením hloubky svaru na 50 mm.



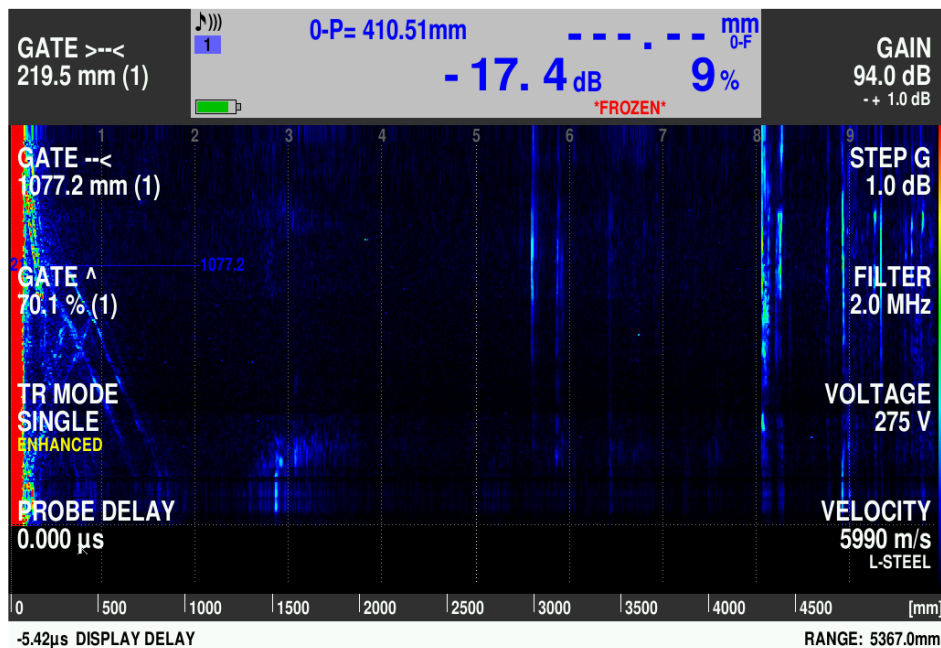
Obr. 12: Příklad zobrazení koutového svaru kde je úhel 45°, tloušťka desky 15 mm

## 5. Měření výkovků a rotorů

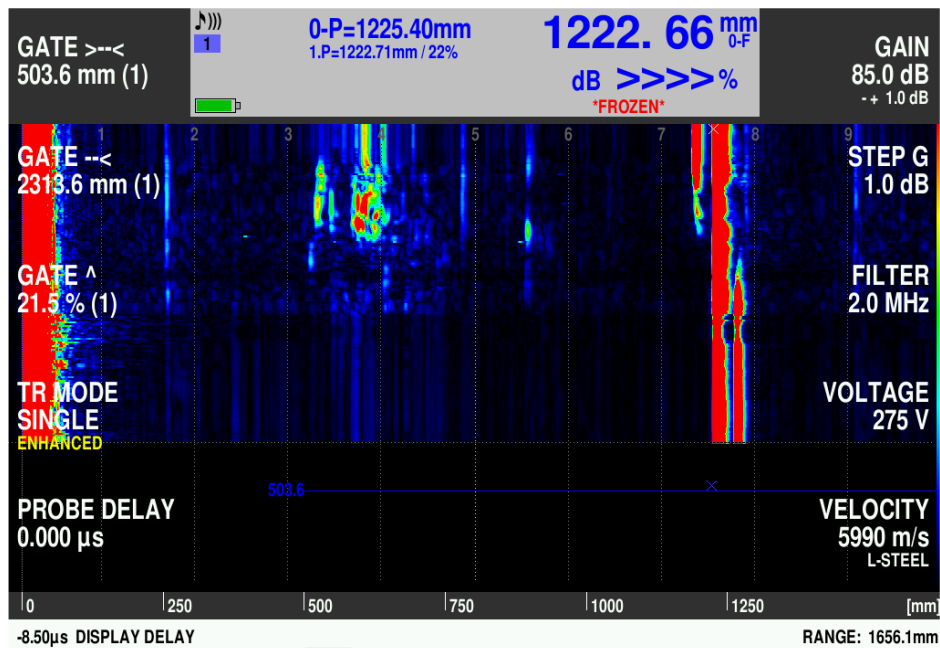
Pro měření výkovků a rotorů je možné využít speciální PA sondy a velkém rozměru 100 mm x 40 mm 2 MHz.



Obr. 13: Měření výkovku s rozsahem 4500 mm

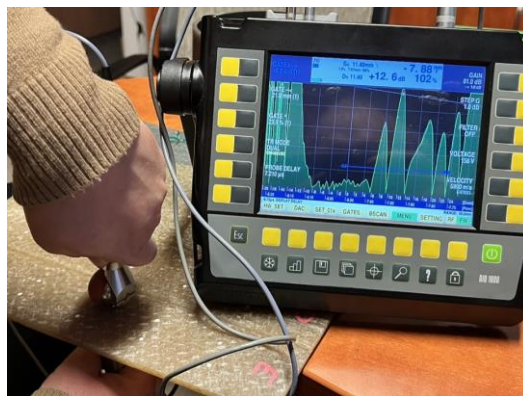


Obr. 14: Měření výkovku s rozsahem 4500 mm – B-zobrazení vnitřních vad



Obr. 15: Měření výkovku s rozsahem 1250 mm

## 6. Měření tloušťky a vnitřních vad pomocí kontaktních sond



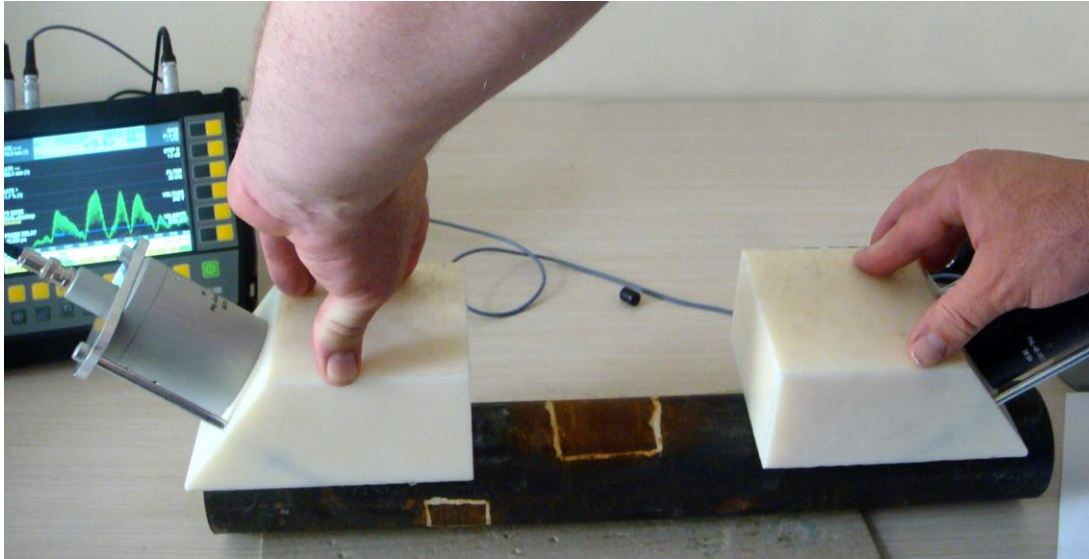
Obr. 16: Měření pomocí rotačních UZ sond, které jsou přitlačeny k povrchu materiálu bez použití tekutého kontaktního media

## 7. Měření defektů trubek – ultrazvuk s guided waves

Pro měření defektů trubek je používá ultrazvuková vlna o podobné vlnové délce jako je tloušťka zkoušených trubek. Pro vytvoření vlny se používá klín dle obr. 17. Touto metodou je možné zkoušet trubky dlouhé desítky metrů.

Pro zkoušení je možné použít klasické UZ sondy nebo PA sondy, kde je možné seřízovat úhel vyzařování elektronicky.





Obr. 17: Při měření pomocí guided waves se k defektoskopu připojí sondy s klíny, které jsou v kontaktu s povrchem zkoušené trubky

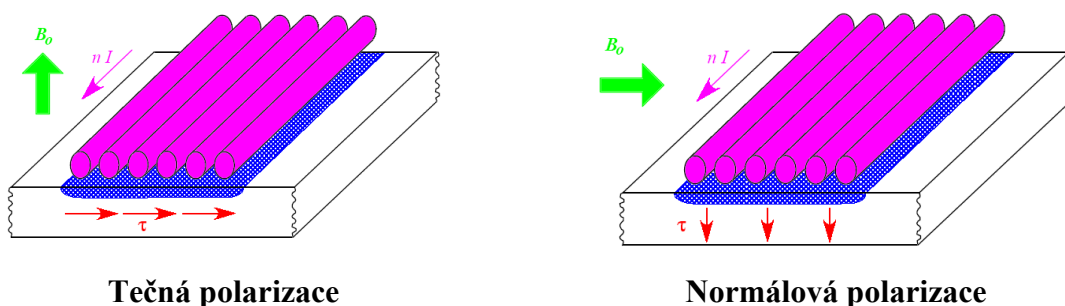
## 8. Měření sondami EMAT

Sondy EMAT umožňují bezkontaktní bezimerzní zkoušení. Základním omezením je citlivost a závislost na povrchové vodivosti, díky principu, který je používán – vířivé proudy o budící frekvenci, které vybudí Lorenzovu sílu, která má tutéž frekvenci. Sondy jsou přeladitelné, u vícekanálových systémů je možné elektronicky měnit úhel vyzařování, takže budou stejně perspektivní jako metod Phased Array. Omezení, které je dáno nízkou účinností se nakonec podaří překonat a metoda bude použitelná nejen pro zkoušení tloušťky ale i pro zkoušení vad.

Tab. 2: Základní typy ultrazvukových vln generovaných pomocí EMAT sond

Typy vln	Směr kmitání částic
Podélné	- Rovnoběžně se směrem šíření
Příčné	- Kolmo ke směru šíření
Povrchové – Rayleighovy vlny	- Eliptická trajektorie
Deskové – Lambovy vlny	- Kolmo k povrchu
Deskové – Loveovy vlny	- Rovnoběžně s rovnou plochou, kolmo ke směru šíření

### 8.1 Základní uspořádání EMAT sond



Obr. 18: Tečná polarizace umožňuje generovat příčnou vlnu, která je velmi důležitá pro měření pnutí v materiálu. Normálová polarizace generuje příčnou vlnu.



Sonda EMAT vhodná pro měření pnutí materiálu a pro měření tloušťky zkoušeného materiálu. Program ukládá profily naměřené tloušťky a v sondě je umístěn snímač souřadnice pohybu sondy.



Obr. 19: EMAT sonda pro měření tloušťek trubek a materiálu umožňuje skenování bez použití vazebních prostředků

## EU PROJEKT OFFERR „EVROPSKÁ PLATFORMA PRO PŘÍSTUP K ZAŘÍZENÍM JADERNÉHO VÝZKUMU A VÝVOJE

### EU PROJEKT OFFERR “EUROPEAN PLATFORM FOR ACCESSING NUCLEAR RESEARCH AND DEVELOPMENT FACILITIES”

Jiří Žďárek a Petr Kadečka

ÚJV Řež, a. s.

#### Abstrakt

Hlavním cílem EU-OFFERR projektu je podpořit SNETP asociaci vytvořit schematickou cestu pro experty v oblasti jaderného výzkumu ke klíčovým infrastrukturám jaderného výzkumu, označené termínem „User Facilities“ s finanční podporou Euratom.

Finanční podporu na prvním místě získají „User Facilities“ z projektu OFFERR pro pokrytí nákladů souvisejících s provozem zařízení pro vybrané projekty v „OFFERR Calls“. Druhou finanční podporu získají výzkumné týmy, které úspěšně předložili výzkumný projekt s využitím „User Facilities“.

V prezentaci budou uvedeny detaily výzkumných oblastí, které byly sestaveny včetně priorit. Uveden bude i souhrn „Fact Sheets“ k výzkumným zařízením a stav podaných návrhů na projekty v prvním výběrovém kole. Obdobné projekty probíhají již několik let v USA, UK, OECD a IAEA.

#### Abstract

The main target of the EU-OFFERR project is to support the SNETP association to develop a schematic road for experts in the area of nuclear research to key infrastructures of nuclear research, identified with the term “User Facilities” with financial support from Euratom.

The financial support will primarily receive “User Facilities” of the OFFERR project to cover expenses to operate the facility of selected projects during the “OFFERR Calls”. Second financial support will be received from research teams that successfully prepared the research project with the use of the “User Facilities”.

In the prepared presentation will be provided details of research areas, were prepared including priorities. Also, a summary of “FACT SHEETS” to the research facilities and the status of proposals was provided during the first call. Similar projects are already running in the USA, UK, OECD and IAEA.

#### Úvodní informace

Hlavním cílem projektu je vytvořit European User Facility Network (EUFN) a vytvořit operativní přístup ke klíčové infrastruktuře jaderného výzkumu pro vědecko-výzkumné experty a studenty. K financování úspěšné infrastruktury budou využity zdroje z EURATOM programu.

Čtyř roční projekt OFFERR byl podán do NRT-12 Euratom výzvy v roce 2021. Projekt byl vyhodnocen a přijat v červnu 2022 a zahájen v září 2022. OFFERR projekt bude velmi potřebný pro vědecko-výzkumnou komunitu k udržení kritické infrastruktury a zároveň umožní mladým výzkumným expertům přístup k této infrastruktuře.

#### Zdůvodnění projektu

Evropa má mnoho výzkumných zařízení, ale velký počet těchto zařízení významně stárne. Některá zařízení z celkové infrastruktury byla budována před 60 lety. Tato zařízení byla budována k zajištění studií nutných pro spuštění prvních komerčních jaderných elektráren v Evropě. Mnoho výzkumných zařízení pro jadernou oblast je již hodně zestárlých. Některé z klíčových

výzkumných zařízení byly již odstaveny z důvodu bezpečnosti, je tedy nutné najít v Evropě finance nutné k tomu, aby vlastníci a provozovatelé těchto zařízení udrželi jejich zařízení v provozu.

Současné komerční reaktory jsou již většinou staré a naše experimentální zařízení jsou nezbytně nutné k určení jejich stárnutí a tím zajistit studie k zajištění jejich LTO. Network jaderných výzkumných zařízení je rovněž nezbytně nutný pro nové JE, ale i pro budoucí generace komerčních reaktorů.

Zajištění energie je klíčovým argumentem pro Evropu, jaderná energie je rozhodující šancí. Je tedy nezbytně nutné zajistit maximum úsilí v oblasti experimentálního výzkumu. Proto je základním cílem projektu OFFERR vybudovat EUFN (European User Facility Network).

Zároveň potřebujeme vybudovat novou Evropskou jadernou infrastrukturu pro budoucí výzkum.

OFFERR projekt zajistí výzvu žádostí k využití výzkumných zařízení ve vytvořeném network. Tyto žádosti s vysokou vědeckou hodnotou jsou nejlepší cestou k využití těchto zařízení. Výzkumná zařízení a žádosti budou strukturovány do „clusters“ a vyhodnoceny panelem nezávislých expertů z jaderné oblasti. Pouze nejlepší žádosti budou vybrány na základě transparentního výběrového procesu. Tyto pak budou financovány z Financial Support to Third Party procesem EC.

V rámci OFFERR projektu, finanční podpora z EC (EURATOM) bude k dispozici pro User Facilities a Visiting Teams for transnational access (mezinárodní charakter přístupu). Finanční podpora je garantována pro projekty společně připravené a odsouhlasené „visiting team“ a provozovatelem zařízení, ale po nezávislém posouzení a validaci návrhu.

### **Základní pravidla OFFERR projektu**

OFFERR consortium je vytvořeno 17 členy zahrnující průmyslové společnosti, univerzity, výzkumné organizace, například JRC (Joint Research Center).

OFFERR Projekt je koordinován EdF.

Pro celkové financování všech schválených projektů je alokována částka 7.2 M EUR. OFFERR projekt je strukturován do sedmi WP:

- WP1 User Facility network,
- WP2 Určení jednotlivých CALLs pro přístup k experimentálním zařízením,
- WP3 Vyhodnocení jednotlivých návrhů,
- WP4 Interakce s jinými mezinárodními projekty,
- WP5 Šíření a využití získaných výsledků,
- WP6 Řízení a komunikace,
- WP7 Řízení přístupu k infrastrukturám.

Je nutné zdůraznit, že v rámci OFFERR projektu jsou k dispozici dva možné návrhy projektů: Fast track a Complex track. Pro Fast Track návrh projektu celková částka pro financování (User Facility a Visiting Team) činí méně než 50k EUR, délka trvání experimentu (od okamžiku začátku) musí být méně než 6 měsíců. Návrhy typu Fast Track jsou z hlediska podmínek a vyhodnocení jednodušší a rychlejší.

Complex Track návrhy budou mít více podmínek na vyhodnocení a budou vyžadovat delší čas na zhodnocení. Celková maximální částka podpory je 1MEUR. Očekává se méně než 20 Complex Track návrhů a jen velmi málo návrhů může překročit částku 300k EUR.

### **Procedura výběru žadatele**

První Call byl vyhlášen v březnu 2023. Druhý Call v červnu 2023.

Pro Fast track žádosti s finanční podporou 60k EUR a délkou trvání 6 měsíců, první datum ukončení podání návrhu je konec května 2023 a první projekt bude zahájen v srpnu 2023.

Pro Complex project žádosti s finanční podporou více než 60k EUR, první konečný den podání je konec srpna 2023. Následně žádosti budou vyhodnoceny a vybrány.

Následující oblasti pro návrhy projektů jsou definovány:

- Light water reactor sustainability,
- Advanced fission reactors,
- Nuclear science,
- Advanced Nuclear fuels,
- Innovation in instrumentation,
- Radioprotection and Nuclear medicine.

Finanční podpora je nejdříve určena provozovateli experimentálního zařízení a následně výzkumnému týmu, který se podílel na přípravě projektu. Provozovateli zařízení bude uhrazeno – odpisy a náklady na provoz. Výzkumnému týmu bude uhrazeno cestovné, ubytování, náklady za účast.

### Databáze EUFN (European User Facility Network)

Cílem EUFN databáze je vytvořit European Network zkušebních zařízení (R&D laboratoří k podpoře jaderných aktivit). Tento network je výrazně podpořen SNETP.

Pro přípravu návrhu projektu, OFFERR vyžaduje, aby každé kandidátské zařízení nabízené pro finančně podpořenou návštěvu výzkumného týmu připravilo Factsheet.

Factsheet má tři hlavní cíle:

- Připravit technický popis zařízení pro pomoc návštěvnímu týmu výzkumníků identifikovat zařízení, které umožní splnit předpokládané experimentální aktivity. Toto by mělo být splněno obecným technickým popisem a dále specifickým popisem.
- Identifikace potenciálních technických podmínek a bezpečnosti včetně dalších administrativních podmínek, které mohou limitovat použitelnost pro navržené aktivity.
- Potvrzení vlastníka zařízení podílet se na procesu zajištění mezinárodní účasti na zařízení na základě podmínek OFFERR a financování z EC/EURATOM.

### Stav OFFERR na začátku projektu

Na začátku roku 2023 první EUFN byl vytvořen na základě 185 výzkumných zařízení, které byly dále tříděny do různých technických „clusters“ odpovídajících různým výzkumným oblastem. V tabulce 1 jsou uvedeny hlavní „clusters“ identifikované v databázi.

Tab. 1: Technická „clusters“ v databázi OFFERR

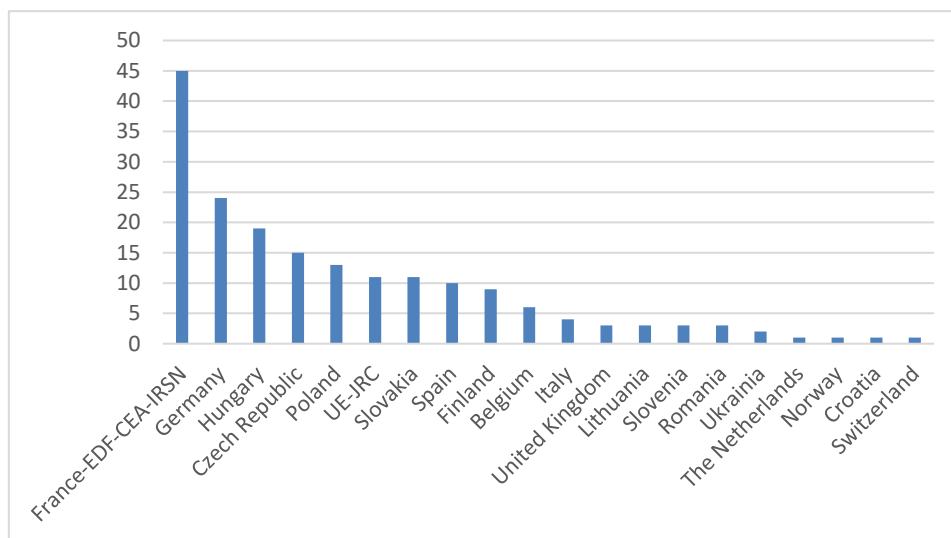
REFERENCE	DESCRIPTION
CL1	Neutronic Research Area
CL2	Radiation & Radiation Protection
CL3	Radiochemistry Research Area
CL4	Thermal Hydraulic Research Area
CL5	Material Research Area
CL6	NPP Safety Research Area
CL7	Modelling & Simulation Area
CL8	Nuclear Waste (EURAD)
CL9	Radiation Protection (PIANOFORTE)
CL10	Nuclear Materials (ORIENT-NM)
CL11	All

Každé z navržených zařízení bude přesně popsáno ve factsheet. Tímto popisem bude umožněno potenciálnímu uživateli vybrat nejlepší výzkumné zařízení a zabezpečit nabídku pro daný call. Katalog všech zařízení a detailní factsheet je jednoduše přístupný na OFFERR web site.

První EUFN Databáze má následující charakteristiky:

- 185 výzkumných zařízení bylo identifikováno jako reprezentativní z výzkumných ústavů, průmyslu i akademií.
- 20 zemí a EU institucí (JRC) je prezentováno.
- 1 až 45 výzkumných zařízení je navrženo z jedné země.

Graf na obr. 1 znázorňuje počet výzkumných zařízení navržených pro OFFERR jednotlivými zeměmi.



Obr. 1: Počet výzkumných zařízení navržených pro OFFERR jednotlivými zeměmi

## Závěry

OFFERR projekt byl úspěšně zahájen, nyní je vyvíjeno maximální úsilí, aby pro druhý vyhlášený Call a rovněž pro všechny následující byl přijat co největší počet kvalifikovaných přihlášek. Pro první Call bylo podáno pouze 5 návrhů, potvrzeno pro další vyhodnocení 4 návrhy.

Dalším cílem organizace projektu je vytvořit efektivní spolupráci s ostatními mezinárodními projekty: OECD-FIDES, IAEA, NSUF-US, NNUF-UK a rovněž s ENEN++.

OFFERR projekt jednoznačně zabezpečí celé jaderné komunitě být udržitelná a bezpečná pro budoucnost.

## Literatura

- [1] WP1.D1.2 SNETP Database of Users Facilities. First Edition. Date: 2023, March 2<sup>nd</sup>.
- [2] Minutes Steering Committee 30 May 2023.
- [3] Minutes off Meeting First General Assembly, September 7<sup>th</sup> and 8<sup>th</sup> 2022.
- [4] European User Facility Network, Catalogue of Facilities [www.snetp.eu/eufn](http://www.snetp.eu/eufn) February 2023.



## **APAL – EVROPSKÝ PROJEKT ZAMĚŘENÝ NA VÝVOJ POKROČILÝCH METOD HODNOCENÍ TLAKOVĚ-TEPLOTNÍCH ŠOKŮ**

### **APAL – EUROPEAN PROJECT FOCUSED ON DEVELOPMENT OF ADVANCED METHODS OF PRESSURIZED-THERMAL SHOCK ASSESSMENT**

Vladislav Pištora

ÚJV Řež, a. s.

#### **Abstrakt**

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je klíčovou a prakticky nevyměnitelnou komponentou jaderné elektrárny (JE). Pro její dlouhodobou životnost (LTO) je nutno zajistit odolnost proti křehkému lomu i za podmínek nehod typu tlakově-teplotní šok (PTS). Vývoj metodiky tohoto hodnocení je prováděn v evropském projektu APAL (Advanced PTS Analysis for LTO) řešeném v letech 2021–2024 v rámci programu HORIZON 2020. Projektu se účastní 14 evropských organizací. Hodnocení PTS v rámci APAL zahrnuje termohydraulické i pevnostní analýzy, a to jak deterministické, tak pravděpodobnostní. Zcela nové je propojení pravděpodobnostního přístupu k termohydraulickým analýzám s pravděpodobnostním přístupem k pevnostním analýzám.

#### **Abstract**

A reactor pressure vessel (RPV) is the key and practically not replaceable component of any nuclear power plant (NPP). For its long-term operation (LTO) it is necessary to assure its resistance against brittle fracture and also for the conditions met during pressurised-thermal shock (PTS) type emergency events. Methodologies of this assessment are developed within the European project APAL (Advanced PTS Analysis for LTO) conducted during 2021 – 2024 years under the framework programme HORIZON 2020. 14 European research organisations take part in this project. PTS assessment performed within the APAL project consists of thermal-hydraulic and structural analyses, both deterministic and probabilistic. The new feature of APAL is performing probabilistic analyses for both thermal-hydraulic and structural part of PTS analyses.

#### **Úvod**

Dominantním degradačním mechanismem materiálů TNR je radiační křehnutí, zejména v oblasti naproti aktivní zóně. Pokud je ve zkřehlé oblasti TNR přítomný defekt (pro výpočty interpretovaný jako trhлина) a dojde k nehodě typu PTS, může potenciálně dojít k iniciaci náhlého lomu a rychlému šíření trhliny skrz stěnu TNR, což nakonec může vést k selhání TNR.

Analýzy PTS jsou součástí hodnocení integrity a životnosti TNR. PTS je charakterizován rychlým ochlazením média v sestupné šachtě reaktoru (teplotní šok), obvykle při současně vysoké úrovni tlaku v reaktoru.

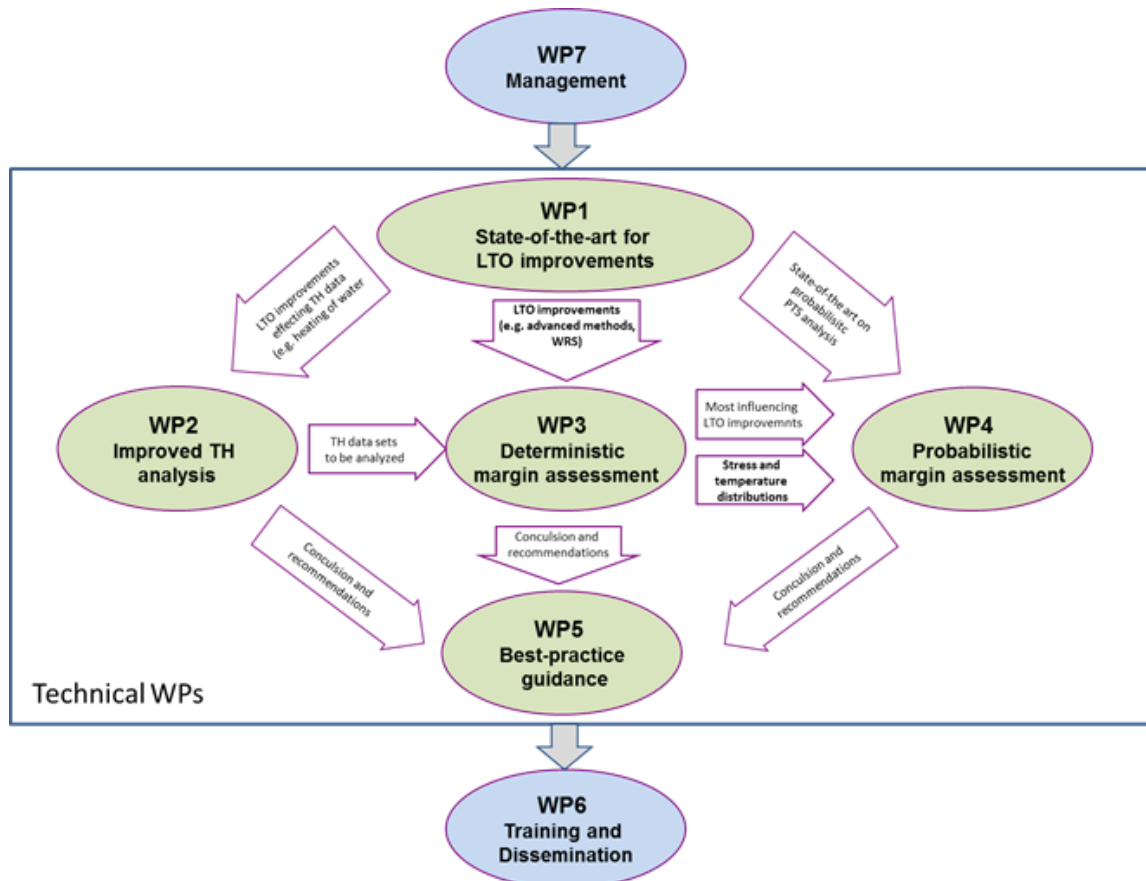
#### **Projekt APAL**

V současnosti se v zemích EU provádí hodnocení PTS pro provozované JE výlučně pomocí deterministického přístupu s uvažováním konzervativních hodnot počátečních a okrajových podmínek a materiálových vlastností. Hodnocení integrity TNR v mnoha případech dosahuje svých limitů, které by neumožnily dlouhodobý provoz (LTO) JE. Tyto analýzy v sobě ovšem zahrnují inherentní bezpečnostní rezervy. Proto je cílem provádět zdokonalené PTS analýzy, jejichž výsledky by nebyly nadměrně konzervativní. Kromě zdokonalených analýz PTS lze

na JE aplikovat i určitá zdokonalení pro dlouhodobý provoz (LTO improvements). Kvantifikace bezpečnostních rezerv z hlediska rizika selhání TNR při použití pokročilých pravděpodobnostních metod hodnocení se tedy stává stále významnější.

Pro řešení těchto problémů byl spuštěn projekt APAL (Advanced PTS Analysis for LTO) financovaný Evropskou unií v rámci programu HORIZON 2020. Projekt byl zahájen v říjnu 2020 a potrvá 4 roky. Hlavními cíli projektu je vývoj metod pokročilých pravděpodobnostních analýz PTS, kvantifikace bezpečnostních rezerv vybraných zdokonalení pro dlouhodobý provoz (LTO improvements) a příručky nejlepší praxe pro hodnocení PTS.

Projekt APAL je rozdělen do 7 „pracovních balíčků“ (work packages, WP). Struktura projektu APAL je uvedena na obr. 1.



Obr. 1: Struktura projektu APAL

## Jednotlivé WP projektu APAL

### WP1 – Nejmodernější zdokonalení pro dlouhodobý provoz

WP1 zahrnuje rozsáhlý přehled existující literatury a souhrn zkušeností partnerů projektu APAL s jednotlivými zdokonaleními pro dlouhodobý provoz s dopadem na výsledky analýz PTS. Bylo vybráno těchto 5 oblastí, které byly zpracovány v samostatných zprávách:

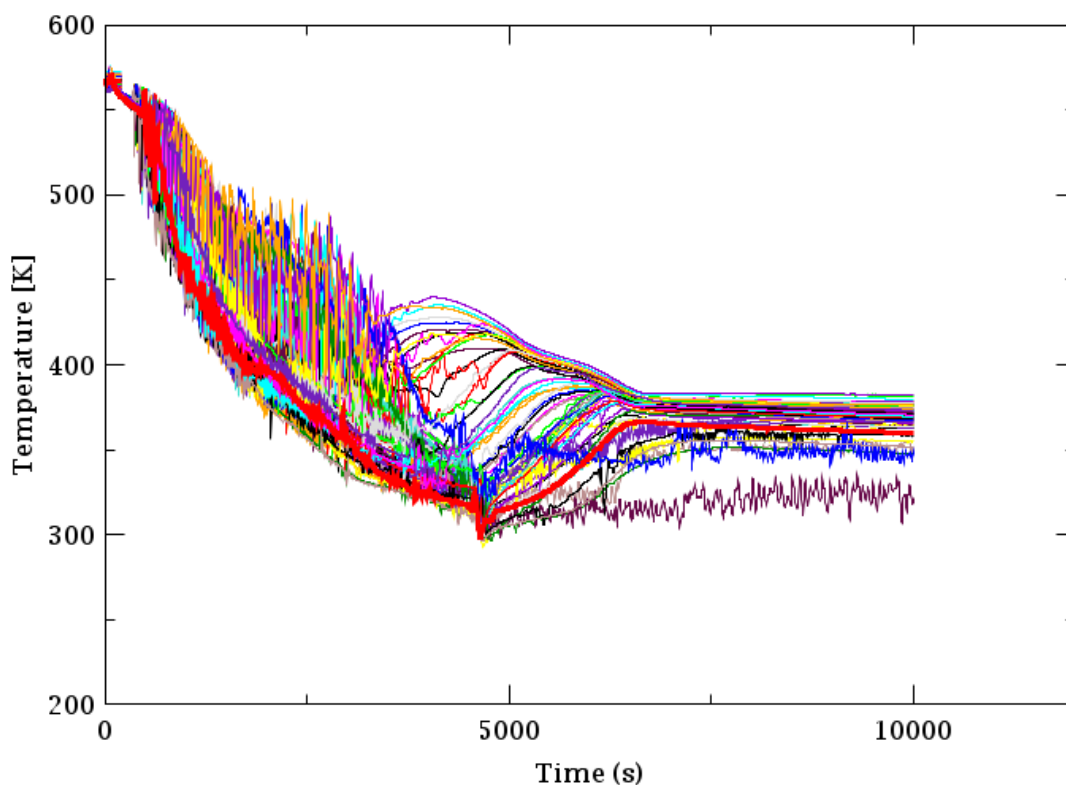
- zbytková napětí ve svarech a návarech TNR,
- aplikace přístupu přetížení za tepla (warm pre-stress, WPS) v analýzách PTS,
- termohydraulické analýzy PTS (včetně zahrnutí zásahů operátora),
- pravděpodobnostní analýzy PTS,
- další potenciální zdokonalení pro dlouhodobý provoz (úpravy parametrů systémů JE) relevantní pro PTS analýzy.

WP1 byl ukončen a jeho souhrnná zpráva [1] je veřejně k dispozici na webu: [www.apal-project.eu](http://www.apal-project.eu).

### WP2 – Zdokonalené termohydraulické analýzy

V rámci WP2 byly sestaveny modely pro systémové termohydraulické (TH) analýzy PTS pro JE typu KONVOI. Tyto modely byly sestaveny pro TH programy RELAP5, ATHLET a TRACE. Dále byly sestaveny modely pro TH analýzy míšení pro programy GRS-MIX a KWU-MIX. Výpočty byly provedeny pro událost LOCA DN 50 mm. Kromě základní úlohy (base case) bylo analyzováno 6 zdokonalení pro dlouhodobý provoz zaměřených na změny parametrů systémů JE a 3 zdokonalení pro dlouhodobý provoz zaměřené na zásahy operátora, které mohou zmírnit průběh PTS.

Dále byly ve WP2 provedeny analýzy termohydraulických neurčitostí. Bylo vybráno cca 30 parametrů vstupujících do TH analýz, a to jak parametry systémů JE (např. teploty, tlaky, úrovně v jednotlivých zařízeních, charakteristiky čerpadel), tak vnitřní parametry TH výpočtových programů (různé koeficienty). Tyto parametry byly uvažovány jako statistické distribuce, namísto obvyklého uvažování jejich konzervativních hodnot. Pomocí Wilksovy metody byly náhodně generovány vstupní parametry pro 59 termohydraulických simulací (v některých případech až 130 simulací). Příklad výsledků TH analýz programem RELAP5 pro 59 simulací je uveden na obr. 2. Výsledky TH analýz budou následně použity ve WP3 a WP4 pro deterministické a pravděpodobnostní pevnostní analýzy PTS. WP2 byl ukončen a jeho souhrnná zpráva [2] je veřejně k dispozici na webu [www.apal-project.eu](http://www.apal-project.eu).

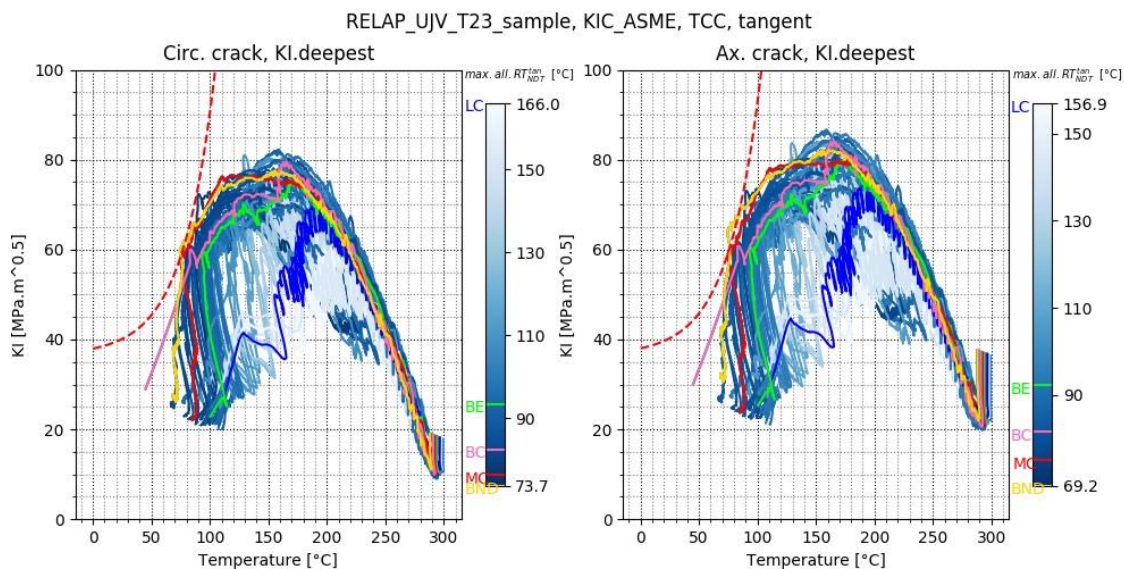


Obr. 2: Teplota v sestupné šachtě reaktoru (59 simulací)

### WP3 – Deterministické hodnocení bezpečnostních rezerv

V rámci WP3 se provádějí deterministické teplotní, mechanické a lomově-mechanické analýzy režimů PTS, přičemž za vstupní data slouží parametry vystupující z TH výpočtů (tlak, teploty a součinitele přestupu tepla v sestupné šachtě reaktoru). Cílem je kvantifikovat bezpečnostní rezervy jak pro jednotlivá zdokonalení pro dlouhodobý provoz, tak pro analýzy termohydraulických neurčitostí. Výsledkem deterministických analýz je maximální přípustná

přechodová teplota (např. označena max. all.  $RT_{NDT}$ ). Základem pro tyto analýzy byl benchmark, na kterém se ověřily výsledky všech partnerů projektu na jednoznačně zadané úloze. WP3 dosud probíhá, k dispozici jsou některé předběžné výsledky. Příklad výsledků deterministických PTS analýz programem pro 59 simulací je uveden na obr. 3 (vlevo pro obvodovou trhlinu, vpravo pro osovou trhlinu).



Obr. 3: Závislost součinitele intenzity napětí na teplotě pro 59 simulací a maximální přípustná  $RT_{NDT}$

#### WP4 – Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnostních rezerv

V rámci WP3 se provádějí pravděpodobnostní teplotní, mechanické a lomově-mechanické analýzy režimů PTS, přičemž za vstupní data slouží parametry vystupující z TH výpočtů. Cílem je kvantifikovat bezpečnostní rezervy jak pro jednotlivá zdokonalení pro dlouhodobý provoz, tak pro analýzy termohydraulických neurčitostí. Bezpečnostní rezervy budou kvantifikovány v termínech rizika selhání TNR. WP3 dosud probíhá, výsledky zatím nelze prezentovat.

#### WP5 – Příručka nejlepší praxe

Ve WP5 budou shrnuty doporučení a závěry z předcházejících technických WP pro stanovení nejlepší praxe pro provádění pokročilých analýz PTS pro LTO. Při přípravě této příručky bude využita spolupráce s Poradním výborem projektu APAL, národními dozorními orgány, JE a výrobcí reaktorů. Za tímto účelem bylo, resp. bude, v rámci projektu organizováno několik workshopů.

#### WP6 – Výcvik a šíření výsledků projektu APAL

V rámci WP6 bylo/bude organizováno několik výukových kurzů, stáží a workshopů s cílem přípravy mladých odborníků k provádění analýz PTS. Dále bylo/budou výsledky projektu prezentovány na mnoha národních a mezinárodních konferencích.

#### WP7 – Management

V rámci WP7 je prováděna koordinace celého projektu, včetně řešení smluvních a finančních záležitostí.

#### Literatura

- [1] CUETO-FELGUEROSO, Carlos, et al. *Public Summary Report of WP1*. 2022, Deliverable No. D1.6, Project APAL, Grant Agreement No. 945253.
- [2] KRÁL, Pavel, et al. *Public Summary Report of WP2*. 2023, Deliverable No. D2.4, Project APAL, Grant Agreement No. 945253.



## VYUŽITÍ MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES V RÁMCI ŘEŠENÍ EVROPSKÝCH PROJEKTŮ HORIZON 2020

### UTILIZATION OF THE MINIATURIZED TEST SPECIMENS WITHIN THE EUROPEAN PROJECTS HORIZON 2020

Radim Kopřiva, Jitka Kahoun Hejhalová, Veronika Kozáková, Petra Klatovská a Ivana Schnablová

ÚJV Řež, a. s., Divize Integrita a technický inženýring, Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

#### Abstrakt

Nejen v návaznosti na trend prodlužování životnosti průmyslových komponent je nutné disponovat přesnými informacemi o aktuálním stavu vlastností konstrukčních materiálů hodnocených komponent. Pro mnoho klíčových komponent je nemožné stanovit materiálové parametry prostřednictvím odběru materiálu pro konvenční zkoušky mechanických vlastností bez ovlivnění provozuschopnosti a integrity komponenty. Možným řešením je využití metodik pro zkoušky miniaturizovaných zkušebních těles. V poslední době je v rámci evropských projektů programu HORIZON2020 věnována značná pozornost využití těchto metod pro stanovení aktuálních provozních parametrů průmyslových komponent, zejména v jaderné energetice. Příspěvek je zaměřen na prezentaci aktuálních výsledků získaných v rámci mezilaboratorních porovnávaných evropských projektů FRACTESUS, STRUMAT-LTO a DELISA-LTO.

#### Abstract

Not only in connection with the trend of industrial components service life extension, it is also necessary to have precise information on the evaluated components' structural materials' actual properties. For many key components, it is impossible to determine material parameters through material sampling for conventional mechanical properties testing without affecting the serviceability and integrity of the component. A possible solution is the use of miniaturized test specimen methodologies. Recently, within the European HORIZON2020 initiative, considerable attention has been paid to the use of these methods for the determination of actual operating parameters of industrial components, especially in the nuclear power industry. This paper focuses on the presentation of recent results obtained in the framework of inter-laboratory comparisons in the European projects FRACTESUS, STRUMAT-LTO, and DELISA-LTO.

#### Miniaturizovaná tělesa pro zkoušky mechanických vlastností

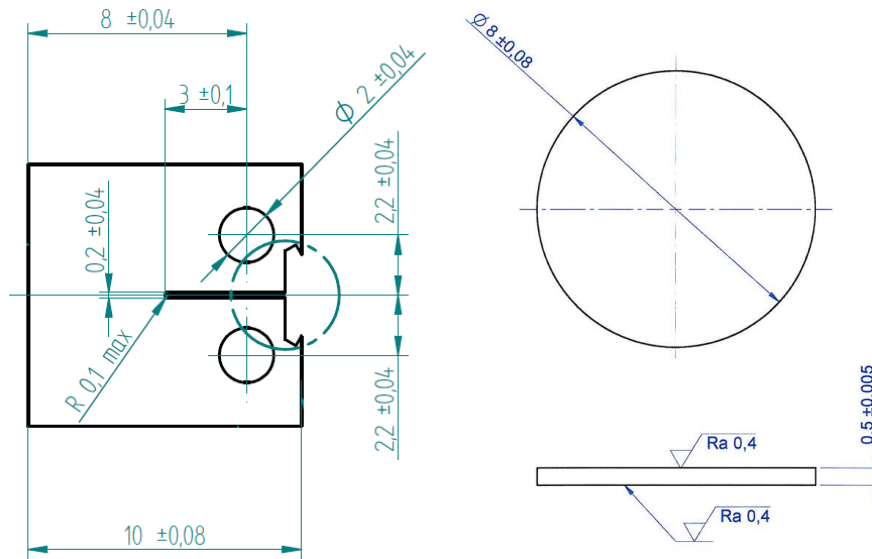
Východícím stavem pro využití miniaturizovaných zkušebních těles je potřeba znalosti aktuálních provozních parametrů hodnocené komponenty za současné nutnosti zachování její plné integrity a provozuschopnosti. Využití klasických experimentálních metod pro hodnocení mechanických vlastností není obvykle možné, jelikož získání objemu materiálu nutného k provedení zkoušek (např. rázem v ohybu, tahových zkoušek) by pravděpodobně vedlo k ohrožení provozuschopnosti či k destrukci hodnocené komponenty.

Existence technologií odběrových zařízení, schopných vyjmout dostatečně malé množství materiálu (mechanicky, případně elektro erozivně) z provozované komponenty, přináší prostor pro aplikaci perspektivních metod zkoušek mechanických vlastností prostřednictvím miniaturizovaných těles. V současnosti nejvíce rozšířenými metodami pro zkoušky malých vzorků, zejména v oblasti materiálů jaderné energetiky, jsou penetrační zkoušky (*angl. Small Punch Test* – dále SPT) a zkoušky statické lomové houževnatosti prostřednictvím miniaturizovaných těles na excentrický tah (mCT). Geometrie používaných zkušebních těles (viz obr. 1) umožňuje získání mechanických vlastností z minimálního objemu odebraného materiálu.

Další možností pro aplikaci miniaturizovaných těles je využití již odzkoušených vzorků z konvenčních zkoušek, což může být vhodným řešením v situacích, kdy originální archivní



konstrukční materiály provozovaných komponent již nejsou dostupné, a množství materiálu pro realizaci standardních zkoušek mechanických vlastností je omezené.



Obr. 1: Miniaturizovaná zkušební tělesa – mCT těleso pro zkoušky statické lomové houževnatosti v excentrickém tahu (vlevo), zkušební těleso pro SPT (vpravo)

### Normativní opora ve využití miniaturizovaných zkušebních těles

Komplikací v rozvoji a praktické aplikaci nových experimentálních metod v průmyslové praxi je obvykle absence plnohodnotného technického standardu, který poskytuje provozovateli hodnocené komponenty jistotu věrohodnosti prezentovaných výsledků. Tak tomu bylo několik let nazpět i v případě prezentovaných zkušebních těles SPT a mCT.

Přestože je metoda SPT využívána již od 80. let minulého století, až donedávna neměla žádnou oporu v celosvětově uznávaném standardu. Evropská iniciativa k vytvoření normativního dokumentu byla zahájena na přelomu století a byla završena v roce 2007 vydáním pre-normativního dokumentu CWA 15627 [1]. Ten poskytoval podporu pro realizaci zkoušek na základě sjednocených parametrů a přístupů hodnocení generovaných dat, nicméně se o plnohodnotnou technickou normu nejednalo. Snaha o vytvoření evropské normy byla zahájena v roce 2016 a jejím výsledkem bylo v roce 2021 vydání standardu EN 10371 [2]. Celý popis evropské standardizace je přehledně uveden v [3]. Standardizace v rámci ASTM byla zahájena v roce 2014 a byla završena v roce 2020 vydáním normativního dokumentu ASTM E3205 [4]. Oba plnohodnotné standardy byly založeny na výsledcích rozsáhlých mezilaboratorních studiích (např. 12 laboratoří a 8 hodnocených konstrukčních materiálů v rámci ASTM).

Geometrie těles pro excentrický tah není v oblasti provádění zkoušek statické lomové houževnatosti žádnou novinkou, nicméně rozměr tělesa typu mCT nebylo možné dle výkladu existujících standardů plnohodnotně použít a požadavky na standardní zkušební tělesa (např. 0,5T-CT, 1T-CT) bylo obtížné aplikovat na tělesa mCT. Realizací mezilaboratorních studií v rámci ASTM, zejména komise E10 – Nuclear Applications, byl získán dostatečný objem dostupných dat pro úpravu stávajících normativních dokumentů, a tak je nyní použití mCT těles v souladu s mnoha standardy, např. ASTM E1921 [5].

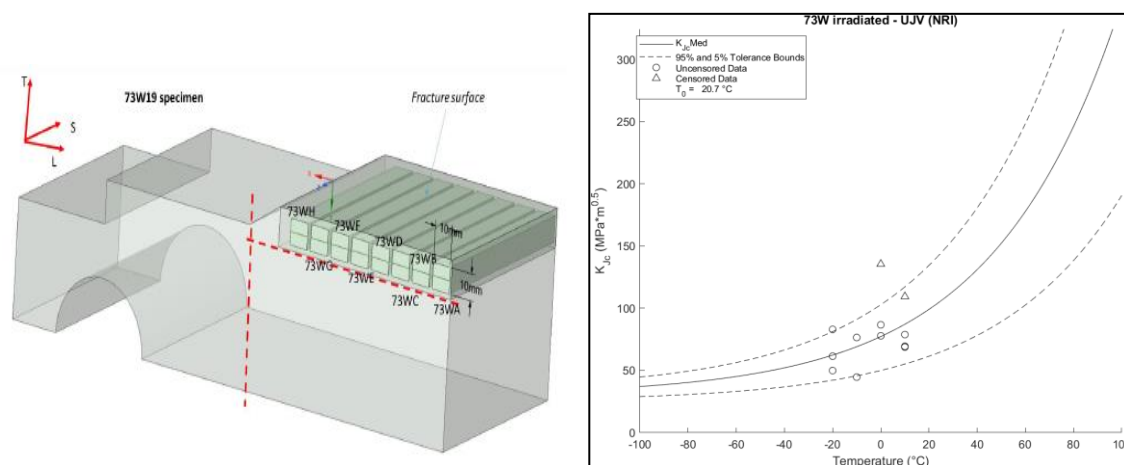
Miniaturizovaná zkušební tělesa mají v současné době dostatečnou normativní podporu v podobě mezinárodně uznávaných technických standardů a je možné je tak plnohodnotně využívat pro aplikace, které neumožňují využití konvenčních metod mechanických zkoušek.

## Evropské výzkumné projekty HORIZON

Program HORIZON je jedním z hlavních nástrojů Evropské unie pro podporu vědeckého výzkumu a inovací. Program HORIZON 2020 pro roky 2014–2020 zahrnoval různé oblasti vědeckého výzkumu a technologického rozvoje, včetně oblasti jaderné energie, prostřednictvím výzev Euratom. Evropská společenství pro atomovou energii byla součástí programu HORIZON 2020 a zaměřovala se na výzkum a inovace v oblasti jaderné energie a jaderného výzkumu. Výzkumné projekty v rámci výzev Euratom byly zaměřeny na širokou škálu témat a aktivit spojených s jadernou energií a bezpečností jaderných zařízení. Tyto projekty byly a jsou financovány z rozpočtu Evropské unie s cílem podpořit inovace a posílit konkurenceschopnost Evropy v oblasti jaderné energie. Některé realizované projekty jsou zaměřeny na rozvoj nových přístupů experimentálního hodnocení konstrukčních materiálů jaderných elektráren pro získání nových informací a výsledků pro zajištění dlouhodobého provozu hodnocených komponent.

### Projekt FRACTESUS (Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens)

Projekt je realizován v období let 2020–2024 přímo za účelem zhodnocení použitelnosti mCT těles pro zkoušky statické lomové houževnatosti ozářených materiálů tlakových nádob jaderných reaktorů. Základem projektu je realizace rozsáhlého mezilaboratorního porovnání na neozařených i na ozářených materiálech (ozařovaných na experimentálním reaktoru LYRA v SCK-CEN, Belgie) [6]. Kromě experimentálního programu je mezilaboratorní studie realizována i prostřednictvím výpočtových FE analýz za definovaných jednotných parametrů (geometrie tělesa, zatěžování). Součástí projektu je mezilaboratorní porovnání mCT těles na ozářeném materiálu svarového kovu 73W, ke kterému byly základem dříve odzkoušená tělesa standardních rozměrů (viz obr. 2).



Obr. 2: Možnosti výroby mCT těles z dříve odzkoušených velkých vzorků (vlevo), výsledky statické lomové houževnatosti na mCT na materiálu 73W v ozářeném stavu dle [5] (vpravo)

### Projekt STRUMAT-LTO (STRUCTURAL MATERIALS research for safe Long Term Operation of LWR NPPs)

Cílem projektu je rozšíření databáze dostupných výsledků mechanických vlastností pro ozářené materiály tlakových nádob reaktorů a zpřesnění trendových křivek využívaných pro hodnocení jejich životnosti. Kromě využití miniaturizovaných zkušebních těles pro zkoušky rázem v ohybu, a jejich porovnání se standardními tělesy typu Charpy, je pozornost několika pracovních skupin věnována i mezilaboratorním porovnáním na miniaturizovaných tělesech SPT a mCT. Aktuálně dostupné výsledky vykazují dobrou shodu s výsledky konvenčních metod mechanického testování [7].

**Projekt DELISA-LTO (DEscription of the extended Lifetime and its influence on the SAFety operation and construction materials performance – Long Term Operation with no compromises in the safety)**

Nejnovějším z prezentovaných výzkumných projektů iniciativy HORIZON 2021 je projekt DELISA-LTO. Jeho realizace je v období 2022–2026 zaměřena na experimentální hodnocení konstrukčních materiálů z primárního okruhu vyřazených bloků JE Jaslovské Bohunice. Experimentální program projektu je založen na rozsáhlé experimentální matici obsahující jak materiály ve výchozím stavu, tak i odebrané v rámci vyřazování po 28 letech provozu elektrárny. Primárním cílem projektu je experimentální hodnocení vlivu tepelného stárnutí na materiály primárního okruhu JE pro získání informací o chování konstrukčních materiálů pro dobu provozování minimálně 60 let. Získání relevantních dat je plánováno prostřednictvím rozsáhlého programu laboratorního stárnutí provozovaných materiálů a následného mezilaboratorního porovnání mezi zapojenými subjekty. Důležitým prvkem experimentální matice je také porovnání výsledků v jednotlivých stavech materiálů s využitím konvenčních geometrií zkušebních těles a miniaturizovaných vzorků. Experimentální matice projektu DELISA-LTO [8] je založena na myšlence maximálně možného podílu mezilaboratorních porovnání v rámci experimentálních aktivit pro zvýšení porovnatelnosti a přesnosti získaných výsledků.

### Závěr

Zkoušky miniaturizovaných zkušebních těles se stávají plnohodnotnou součástí portfolia nástrojů vhodných pro hodnocení materiálů v průmyslových komponentách, zejména v jaderné energetice. Evropské projekty FRACTESUS, STRUMAT-LTO a DELISA-LTO ukazují, že tyto metody jsou spolehlivé, v dobré shodě s výsledky konvenčních zkoušek mechanických vlastností a mají potenciál výrazně přispět k prodloužení životnosti a zlepšení bezpečnosti průmyslových zařízení. Výsledky těchto projektů jsou zásadní pro další rozvoj těchto technologií v oblasti energetiky a průmyslového inženýrství a také rozvoji perspektivních metod mechanických zkoušek s využitím miniaturizovaných těles.

### Literatura

- [1] CWA 15627:2007 - *Small punch test method for metallic materials*, CEN Workshop Agreement, European Committee for Standardization, 2007.
- [2] EN 10371 - *Metallic materials - Small punch test method*, 2021.
- [3] BRUCHHAUSEN, M. et al. European standard on small punch testing of metallic materials. In: *6<sup>th</sup> International Small Sample Test Techniques Conference*, Swansea University, 2018.
- [4] ASTM E3205-20 – *Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken, ASTM International, 2020, doi: 10.1520/E3205-20
- [5] ASTM E1921 - *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T<sub>0</sub>, for Ferritic Steels in the Transition Range*.
- [6] BRYNK, T. et al. FRACTESUS Project: Final Selection of RPV Materials for Unirradiated and Irradiated Round Robins. In: *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2022*, Las Vegas, 2022, doi: 10.1115/PVP2022-83871
- [7] WELSCHEN, R. et al. Round Robin Analysis of Small Punch Testing on 15Kh2NMFA Reference Material, In: *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2022*, Las Vegas, 2022, doi: 10.1115/PVP2022-83811
- [8] BURŠÍK, O. et al. WWER-440 Primary Circuit Thermal Ageing Degradation Assessment Procedure Within the DELISA-LTO Project. In: *EUROMAT2023*, Frankfurt, 2023.

# KOROZNÍ ZKOUŠKY AUSTENITICKÝCH SVARŮ S UHLÍKOVÝM KOŘENEM V OBLASTI MEZE KLUZU ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

## CORROSION TESTS OF AUSTENITE WELDS WITH CARBON ROOT IN THE AREA OF THE YIELD STRENGTH OF THE BASE MATERIAL

Filip Sedlák a Michaela Joanidisová

ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

Cílem studie bylo provedení korozního testu vzorků heterogenního svaru v simulovaných podmínkách autoklávu s následným vyhodnocením a posouzením dosažených výsledků. Vyhodnocení zahrnovalo posouzení míry korozního napadení svaru, kvantifikaci její rychlosti a predikci dalšího možného vývoje koroze v čase.

### Abstract

The aim of this work was to perform a corrosion test of heterogenous weld samples in simulated autoclave conditions with subsequent evaluation and assessment of the achieved results. The evaluation included assessment of the corrosion attack rate of the weld, quantification of its rate, and prediction of further possible development of corrosion over time.

### Úvod

Dodaný vzorek výřezu potrubí z austenitické korozivzdorné oceli 08CH18N10T (etalon svařený na dílně) obsahoval svar, kde základní materiál potrubí byl svařen přídatným materiálem OK TIGROD N 316L (korozivzdorná ocel), přičemž kořen svaru byl proveden a svařen přídatným materiálem OK TIGROD 12.60 (uhlíková ocel).

Autoklávové korozní zkoušky měly prokázat velikost možného korozního napadení austeniticko-uhlíkového svaru na etalonu vzorku, tzn. cílem bylo kvantifikovat velikost, strukturu a rychlost tohoto poškození v podmínkách autoklávu, které odpovídaly stanoveným provozním podmínkám. Samotné vyhodnocení zkoušky zahrnovalo následující činnosti:

- gravimetrická měření vzorků před a po expozici,
- vizuální kontrolu povrchu před a po expozici (mikroskopie) a měření rozsahu korozního poškození (LOM/ SEM),
- spektroskopickou analýzu povrchu kořene svaru po expozici (LOM), v případě zjištěných indikací analýza a vyhodnocení defektů pomocí elektronové spektrometrie SEM.

### Experimentální část

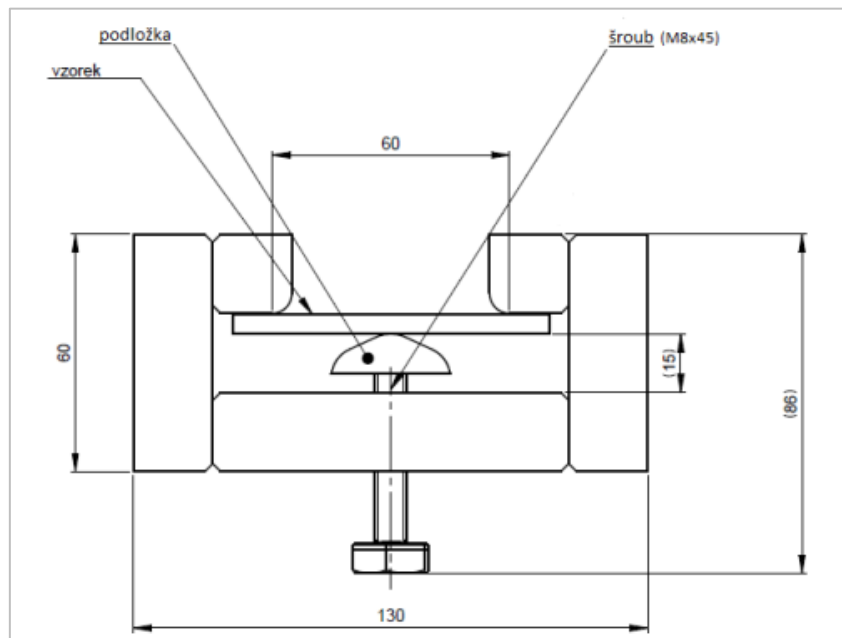
#### Zkušební vzorky

Dodaný vzorek výřezu potrubí z austenitické oceli měl rozměry 219 x 11 mm, z kterého bylo připraveno (vyříznuto a vybroušeno) 8 ks menších vzorků. Dvě vzorky byly připraveny pro test v autoklávu v původním stavu (tj. spolu 10 ks vzorků). Dále bylo pro 6 kusů vzorků zhotoveno 6 kusů držáků pro vytvoření požadovaného předpětí, které bylo definováno zadavatelem. Držáky byly vyrobeny z korozivzdorné oceli 08CH18N10T.

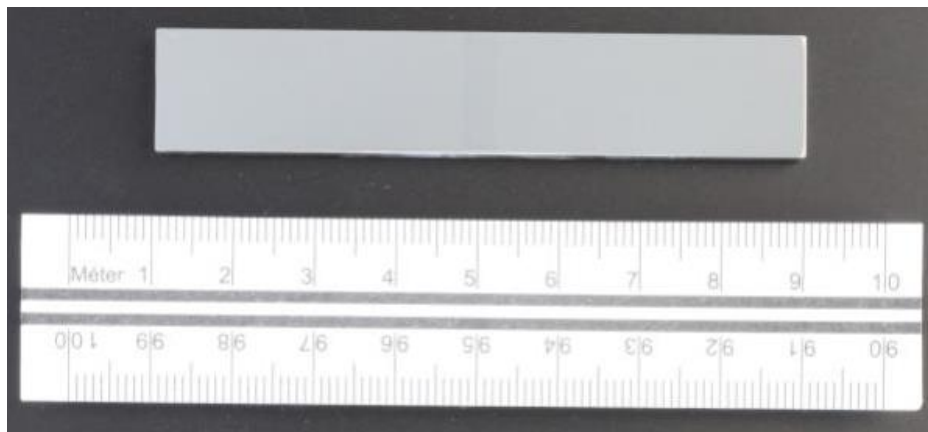
Seznam s rozměry a předpětím vzorků znázorňuje tabulka 1 a sestavu vzorku s držákem pak obr. 1. Opracovaný vzorek znázorňuje obr. 2.

Tab. 1: Seznam a parametry vzorků pro korozní test

Vzorek č.	Rozměry vzorku (mm)	Povrchové opracování vzorku	Hodnota předpětí
1	80/15/5	ano	Mez kluzu
2	80/15/5	ano	
3	80/15/5	ano	
4	80/15/5	ano	V intervalu hodnot meze kluzu Rp1 až Rp5, preferovaná hodnota deformace 2 – 3 % v oblasti základního materiálu (08CH18N10T)
5	80/15/5	ano	
6	80/15/5	ano	
7	80/30/5	ano	Bez zatížení
8	80/30/5	ano	
11	80/12/11	ne	
12	80/12/11	ne	



Obr. 1: Dispoziční náčrvek sestavy držáku



Obr. 2: Fotodokumentace opracovaného vzorku připraveného pro zkoušku v autoklávu



### Testovací aparatura (autokláv)

Vzorky byly uloženy do neprůtočné nádoby autoklávu o průměru 90 mm, výšce 700 mm a objemu 4,6 l. Nastavené experimentální podmínky pro zkoušku byly následující:

- Experiment byl prováděn při teplotě 150 °C, tlaku 6 MPa v roztoku kyseliny borité o koncentraci 12 g/l v demivodě, pH  $\approx$  7 (dosaženo přidavkem KOH 21 mg/kg).
- Vodní roztok byl před začátkem experimentu odplyněn.
- Vzorky byly exponovány v médiu za výše zmíněných podmínek po dobu 60 dní.

### Výsledky zkoušek a hodnocení

#### Gravimetrické měření vzorků před a po expozici

Vzorky byly váženy jak před začátkem experimentu, tak po jeho ukončení. Z důvodů následných metalografických testů nebylo možné vzorky po vyjmutí z autoklávu odmořovat. Výsledky korozních úbytků zjištěných pomocí gravimetrie znázorňuje tabulka 2.

Tab. 2: Výsledky korozních rychlostí (KR) a korozních úbytků (KU) zjištěných pomocí gravimetrie

Vzorek č.	Popis	Plocha (mm <sup>2</sup> )	Hm1 (g)	Hm2 (g)	$\Delta$ Hm (mg)	KR (mm/rok)	KU (g/m <sup>2</sup> /rok)
1	vzorky broušené, pod mechanickým napětím Rp <sub>0,2</sub> %	60,7	44,5002	44,5000	0,25	0,0032	25,05
2		61,8	45,9123	45,9120	0,34	0,0042	33,14
3		65	46,5685	46,5681	0,36	0,0043	33,69
4	vzorky broušené, pod mechanickým napětím Rp <sub>2,5</sub> %	60,4	46,6663	46,6662	0,15	0,0019	14,60
5		58,4	44,5224	44,5223	0,10	0,0013	9,90
6		57,9	45,9145	45,9143	0,17	0,0023	17,86
7	vzorky broušené, bez namáhání	129,8	108,6201	108,6198	0,33	0,0020	15,62
8		123,1	107,6027	107,6014	1,25	0,0079	61,77
11	vzorky nebroušené, bez namáhání	125,5	110,5492	110,5467	2,50	0,0154	121,18
12		132,3	121,8743	121,8704	3,90	0,0228	179,33

#### Hodnocení příčných řezů vzorků č. 1–8 pomocí LOM

V neleptaném stavu byl hodnocen vnitřní povrch vzorků, kde výsledky jsou shrnuty v níže uvedené tabulce 3. Jestli byly během analýz identifikovány vady svarového spoje, jsou také informativně uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Shrnutí výsledků z pozorování příčných řezů vzorků č. 1–8

Vzorek č.	Výrazná koroze	Důlky	Hloubka (μm)	Korozní vrstva	Výskyt	Max. tloušťka korozní vrstvy (μm)	Vada svaru	Max. rozměr vady svaru (μm)
1	ne	ne	-	-	-	-	1x dutina	250 x 190
2	ne	ne	-	ostrůvky	obě linie ztavení	4	2x dutina	60 x 35 25 x 5
3	ne	ne	-	ostrůvky	nerovnoměrně po celém VP, obě linie ztavení SK	4	ne	-
4	ne	ne	-	ostrůvky	obě linie ztavení	4,5	ne	-
5	ne	ano, na rozhraní	4	ostrůvky	rozhraní a SK	3	ne	-

Vzorek č.	Výrazná koroze	Důlky	Hloubka (μm)	Korozní vrstva	Výskyt	Max. tloušťka korozní vrstvy (μm)	Vada svaru	Max. rozměr vady svaru (μm)
6	ne	ne	-	-	-	-	1x shluk dutin	225 x 90
7	ne	ne	-	ostrůvky	SK	2,5	ne	-
8	ne	ano, na rozhraní	4	ostrůvky	SK	3	ne	-

#### LOM/SEM před expozicí

Částečným odfrézováním vnitřního povrchu s kořenem svaru byla u vzorků č. 1–8 dosažena rovina, ve které se kromě kořene svaru vyskytovala i první výplňová housenka (austenit). Ofrézováním části uhlíkového kořene bylo dosaženo odkrytí „heterogenního“ svarového spoje (UO – AKO), který byl předmětem detailní analýzy po expozici vzorků.

Kořen svaru byl ve všech vzorcích obohacen o prvky základního materiálu (Cr, Ni) oproti složení svarového drátu OK TIGROD 12.60.

První výplňová housenka byla naopak o legury (Cr, Ni, Mo) původního svarového drátu OK TIGROD 316L ochuzena, a to natavením a promícháním s materiálem kořene svaru. Další výplňové housenky již mají obsahy prvků blízké původnímu složení svarového drátu.

#### LOM/SEM po expozici

Po expozici se na vnitřním povrchu daných řezů vzorků č. 1 až č. 8 v oblasti svaru nevyskytovaly anebo vyskytovaly jenom patrné nerovnoměrné oxidované oblasti do hloubky jednotek mikrometrů (max. 4,5 μm).

Mezi základním materiálem (ZM) a svarovým kovem (SK) se na vzorku č. 8 v řezu přes svarový spoj v místě výskytu oranžovo-hnědých korozních úsad vyskytovala heterogenita (vměstek). Tato heterogenita byla uchycena na straně ZM a pravděpodobně byla vnesena a uchycena v ZM při broušení. Heterogenita byla složena z matrice obsahující Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti a částic na bázi oxidu Al obsahující příměs Si, P.

Na povrchu vzorku č. 8 byly v místě oranžovo-hnědých korozních úsad patrné důlky o šířce v řádu stovek mikrometrů. Důlky byly částečně vyplněny Cr-O (bohatou kyslíkatou fází), která

dále obsahovala prvky okolní svarové housenky (Fe, Ni) a také nečistoty (Na, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca). Analýza výplně důlků potvrdila, že kvalitativně jde o podobný zdroj nečistoty jako v případě heterogenity identifikované na rozhraní ZM – SK, kde k oběma kontaminacím pravděpodobně přišlo při opracování ZM a povrchu uhlíkového svaru.

### **Závěry**

Umístění heterogenity na vzorku č. 8 uvnitř vrstev SK (UO-smíšená oblast), velikost a chemický charakter potvrdili její minimální vliv na stálost svarového spoje a z pohledu korozního poškození svarového spoje nepředstavuje možné riziko.

Trhliny nebyly na povrchu prokázány ani při detailním hodnocení při větších zvětšeních na stereomikroskopu a elektronovém mikroskopu.

Korozní praskání pod napětím nebylo ani v jednom případě prokázáno.

Na žádném řezu nebyla pozorována mezikrystalová koroze, tak jak je definována normou ČSN EN ISO 3651-2.



## VLIV VELIKOSTI NA KOROZNÍ ÚNAVOVOU PEVNOST LITÉ OCELI 13%CR-4%NI

### SIZE EFFECTS ON THE CORROSION FATIGUE STRENGTH OF 13%CR-4%NI CAST STEEL

David Varner <sup>a)</sup> and Miroslav Varner <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Transcad CZ, s.r.o., Blansko, Czechia

<sup>b)</sup> Litostroj Engineering a.s., Čapkova 2357/5, 67801 Blansko, Czechia

#### Abstrakt

V příspěvku se uvádí statistický, geometrický a technologický vliv velikosti rozměrných dílců vyrobených z lité oceli 13%Cr-4%Ni na jejich korozně únavovou pevnost při počtu kmitů zatížení více než milion. Vlivy velikosti a jejich parametry jsou odvozeny s použitím Weibullový distribuční funkce a výsledků únavových zkoušek hladkých a vrubovaných tyčí ve vodě. Haighův diagram velkých vrubovaných tyčí byl použit pro ověření vlivu velikosti. Popsané vlivy velikosti se doporučují využívat při hodnocení spolehlivosti vodních turbín.

#### Abstract

The article deals with the statistical, geometric, and technological size effects on the corrosion fatigue strength of large parts made from the 13%Cr-4%Ni cast steel for loading cycle number greater than a million. The size effects and their parameters are derived using the Weibull distribution and the results of corrosion-fatigue tests on smooth and notched specimens. A Haigh diagram of a large notched specimen was used for verification of the size effects. The reported size effects are recommended in the reliability evaluation of water turbines.

#### Introduction

The hydraulic and mechanical design of water turbines uses computer simulations of both water flow and mechanical stresses. The simulations provide reliable information about the stress distribution of the parts under the actual pressure load of flowing water [1]. The estimations of part corrosion fatigue strength (*CFS*) necessarily require additional data on material properties. These are, however, influenced by the type of steel, technology, volume, shape and surrounding environment. Material properties determined experimentally are used to model of parts fatigue properties [1-3].

In order to calculate the *CFS* or lifetime of loaded water turbine part from experimental results acquired using small specimens in laboratory tests, three types of size effect have been generally considered: statistical size effect, geometrical size effect and technological size effect.

The statistical size effect is caused by the occurrence of micro-discontinuities, e.g., micro-cracks, porosity, inclusions [4] and some local weakened passive layers [5, 6], with a random distribution in areas exposed to corrosion fatigue of macroscopically homogeneous parts of the casting.

The geometrical size effect is dependent by stress relative gradient in the notch root [4]. The effect is caused by the material anisotropy and size of elementary particles and their supporting effects that occur in and under the root of the notch.

The technological size effect is caused by macroscopic surface or volume inhomogeneity in the distribution and properties of microdefects that arise during steel pouring and casting solidification [7, 8]. The technological effect of the size depends on the casting modulus, the thickness of the casting and the location in the casting [9].



The article presents derivation of the size factors formulas and their parameters based on the results of fatigue tests of Cr13%-4%Ni cast steel specimens in neutral tap water [9-11]. Experimental Haigh diagram of a large notched specimen made from 13%Cr-4%Ni cast steel [11] loaded in water is used to verification of the *CFS* calculation. This approach is necessary especially for large water turbine cast where are appreciable size effects on corrosion fatigue crack initiation.

### Statistical Size Effect

The statistical size effect is described by the Weibull reliability function derived from the Weakest-Link Model [12]:

$$R = \exp \left[ -\frac{A}{A_{ref}} \cdot \left( \frac{S_{ac}}{\delta} \right)^c \right], \text{ for } S_{ac} > 0, \quad (1)$$

where  $R \in (0, 1)$  is reliability or survival probability,  $S_{ac}$  is *CFS* amplitude,  $\delta$  and  $c$  is scale and shape parameter respective of the Weibull distribution,  $A_{ref}$  is surface area reference of smooth specimen and  $A$  is a part surface area with stress field  $S = S(x, y, z)$  and maximum notch stress  $S_{max}$ . The area  $A$  is given by the stress integral [12]:

$$A = \int_A g(x, y, z)^c dA, \text{ with } g(x, y, z) = S(x, y, z)/S_{max}. \quad (2)$$

Statistical size factor *SSF* of a part with fatigue exposed area  $A$  is defined by ratio of the *CFS* limit  $S_{ac}(R, A)$  and  $S_{ac}(R, A_{ref})$ , which are obtained by modified equation (1):

$$SSF(A) = \left( \frac{A_{ref}}{A} \right)^{\frac{1}{c}}. \quad (3)$$

Note: The *SSF* value does not include the usual  $R$  survival probability requirement against a survival probability of  $R = 0.5$ . Therefore, a special reliability factor needs to be taken into account when calculating the *CFS* for  $R \neq 0.5$ . Reliability factor *RF* is described by formula:

$$RF(R) = \left( \frac{\ln(R)}{\ln(0.5)} \right)^{\frac{1}{c}}. \quad (4)$$

Parameters of the Weibull reliability function at  $A = A_{ref}$  are calculated (1) from *CFS* amplitudes  $S_{ac}(R = 0.5)$  and  $S_{ac}(R = 0.9)$  which are acquired from results of corrosion fatigue tests [10, 11]. The calculated Weibull reliability functions of the reference specimen for the load cycle range  $N \in (10^6, 10^{11})$  and of the part with  $A = 10 \cdot A_{ref}$  for  $N = 10^{11}$  are shown in Figure 1.

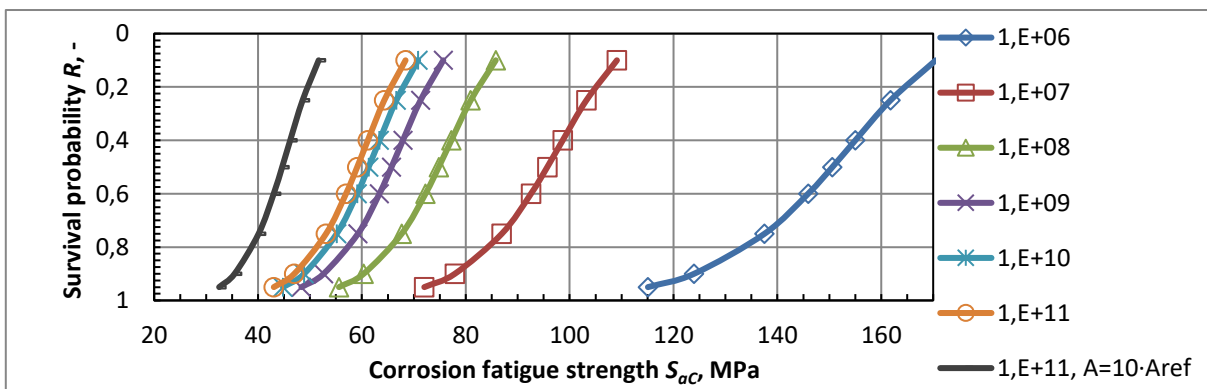


Figure 1: Survival probability of 13%Cr-4%Ni cast steel specimens/part loaded in water

### Geometric Size Effect

Relative stress gradient  $\kappa$  describes influence of stress non-homogeneity at the notch root on the *CFS* using the following formula [4]:

$$\frac{\alpha}{\beta} = 1 + (\kappa \cdot C)^{0.5}, \quad (6)$$

where  $\alpha = \frac{S_{max}}{S_{nom}}$  is stress concentration factor notch,  $\beta = \frac{S_{ac}}{S_{acnom}}$  is fatigue notch factor,  $\kappa = \frac{1}{S1_{max}} \cdot \left(\frac{dS1}{dx}\right)_{x=0}$  is relative gradient of principal stress *S1* in the notch root, *x* is the distance from the notch root entered according to the agreement in mm units, *C* is coefficient depended on material strength, *S1<sub>max</sub>* is maximal principal stress in notch, *S<sub>nom</sub>* is nominal stress in section under notch, *S<sub>ac</sub>* is fatigue strength of smooth specimen and *S<sub>acnom</sub>* is fatigue strength of the notched specimen. Fatigue geometrical size factor of notched specimen (8) includes statistical size effect as well, because the fatigue exposed areas of smooth and notched specimens have different sizes. The calculation of the geometric size factor *GSF* without the statistical size effect is expressed by the relation:

$$GSF = \frac{1}{SSF} \cdot \frac{\alpha}{\beta}. \quad (7)$$

The calculations of the *GSF* are based on the results of corrosion fatigue tests of smooth and notched specimens made from large 13%Cr-4%Ni steel casting [9] and the results of the finite element analysis both of stress concentration factor and of relative stress gradient of notched specimens. Table 1 summarizes input experimental data, stress concentration factor  $\alpha$  and relative stress gradient  $\kappa$  and calculation results of  $\alpha/\beta$ , *C* (8), *SSF* (3) and *GSF* (7). The values of both calculated  $\alpha/\beta$  for *C* = 0.130 (6) and *GSF* (7) in dependency on the relative stress gradient are shown in Figure 2.

Table 1: Input data and calculation results of *GSF*

Experimental data		Computation FEA		Calculation				
<i>S<sub>ac</sub></i> , MPa	<i>S<sub>acnom</sub></i> , MPa	$\alpha$ , -	$\kappa$ , -	$\beta$ , -	$\alpha/\beta$ , -	<i>C</i> , mm	<i>SSF</i> , -	<i>GSF</i> , -
110	104	1.10	0.037	1.048	1.050	0.130	1.047	1.002
110	72	1.91	0.446	1.521	1.256	0.130	1.202	1.045

It is clear that the geometrical size effect on the *CFS* of notched parts is marginal compared to the statistical size effect.

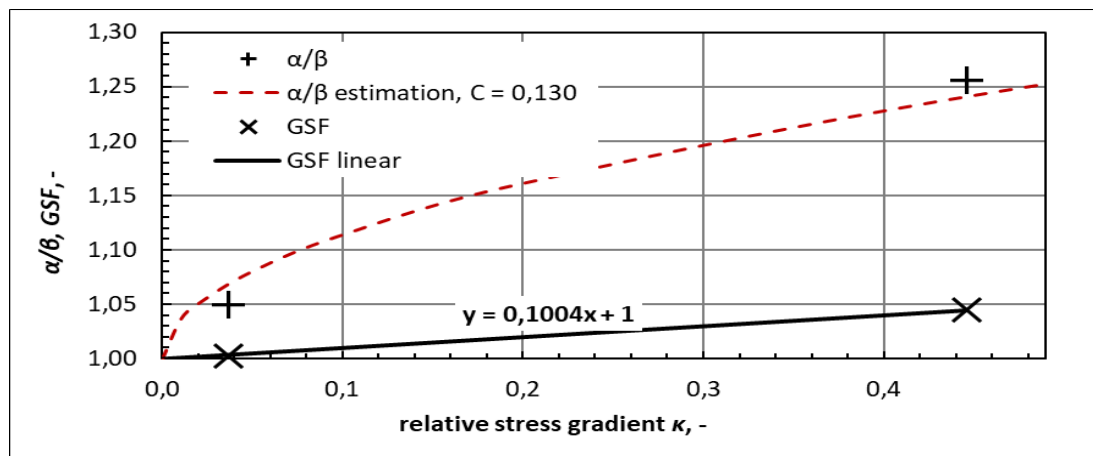


Figure 2: Geometrical size effect of Cr13%-4%Ni cast steel specimens loaded in water

### Technological Size Effect

The technological size effect is caused by macroscopic inhomogeneity in chemical composition and by both distribution and feature of steel and passive layer microdefects. The specimen of a core of thick wall (500 mm) casting from 13%Cr-4%Ni steel shows a 20% lower *CFS* than specimen of casting rim, which was solidified and heat-treated under optimal conditions [7, 8]. The effect of casting size on its surface and in its core on the *CFS* of large notched specimens at  $N = 10^7$  is published [9]. Technological size factor of large notched specimens:

$$tsf(t) = \frac{S_{AC}(t)}{S_{AC}(500\ rim)} \quad (8)$$

is equal 1 for rim of cast with thickness  $t = 500$  mm (cast modulus 13),  $tsf = 1.13$  for rim of cast and core of cast with  $t = 150$  mm (cast modulus 5.5) and  $tsf = 0.87$  for cast core of casting with  $t = 500$  mm. Technological size factor of smooth specimen with reference size [9] is defined by ratio:

$$TSF(t) = \frac{S_{ac}(t)}{S_{ac}(500\ rim)}. \quad (9)$$

*CFS* of large notched specimens manufactured from cast rim with thickness  $t$  and reference cast rim ( $t=500$  mm) are given by the Marin's formulas [13]:

$$S_{ACmax}(t) = k_s \cdot SSF(t) \cdot TSF(t) \cdot GSF \cdot S_{ac}(500\ rim) \quad (10)$$

and

$$S_{ACmax}(500\ rim) = k_s \cdot SSF(500\ rim) \cdot 1 \cdot GSF \cdot S_{ac}(500\ rim). \quad (11)$$

By substituting equations (13) and (14) into equation (11) and modifying it, we obtain the following relation:

$$TSF(t) = tsf(t) \cdot \frac{SSF(500\ rim)}{SSF(t)}. \quad (12)$$

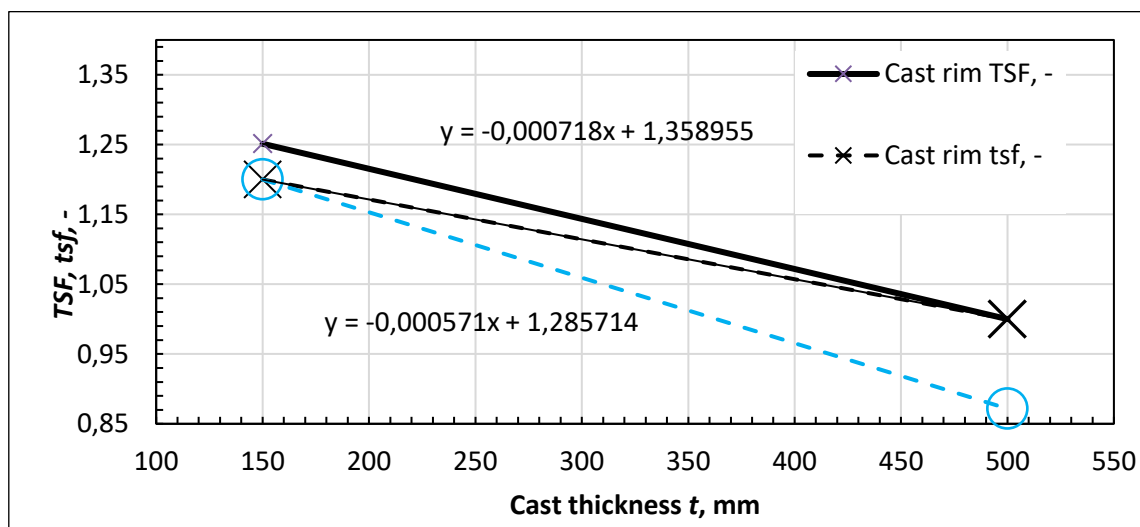


Figure 3: Technological size factor  $tsf$  and  $TSF$  versus thickness  $t$  and location in cast [13]

Technological size factors  $tsf$  and  $TSF$  of cast part versus cast thickness  $t$  and location in cast part are drawn in Figure 3. The technological effect of size, describing the influence of the

macroscopic inhomogeneity of the distribution and properties of microdefects and the passive layer of the cast rim on *CFS*, can be considered as a linear in the first approximation:

$$TSF = -0,000718 \cdot t - 1,359 . \quad (13)$$

### Verification

Verification of size effects for loading in water is based on comparison of the calculated Haigh diagram from the Soncino's corrosion fatigue data of smooth specimen  $\Phi$  16 mm in push-pull loading in water [10] and experimental Mashing's [11] and Gassmann's [9] *CFS* data (large notched 13%Cr-4%Ni cast steel specimen of dimensions 300x82x70 mm and 500x100x40 mm, respectively).

Calculated and experimental results of the *CFS*  $S_{ACmax}$  and mean value  $S_m$  are the maximum stresses in the notch. Corrosion fatigue strength  $S_{ACmax}(N, S_m, R=0.5)$  of a large notched specimen from cast according to Marin [13] is given by formula:

$$S_{ACmax}(N, S_m, t, R = 0.5) = k_s \cdot TSF(t) \cdot SSF(c, A_{ref}, A) \cdot GSF(\kappa) \cdot S_{ac}(N, S_m, A_{ref}, R = 0.5), \quad (14)$$

where  $S_{ac}(N, S_m, R = 0.5)$  is Haigh diagram of smooth specimen,  $k_s$  is ratio of notched and smooth reference specimen surface quality coefficients. Experimental and calculated *CFS* of a large notched specimen is presented in the Figure 4.

The calculated prediction of the *CFS* of the large notched specimen complies with experiment results. The deviation of the *CFS* calculated prediction of the notched body does not have a cumulative character as the number of load cycles increases. Therefore, the described calculation approach of size factor can be recommended for use in engineering practice.

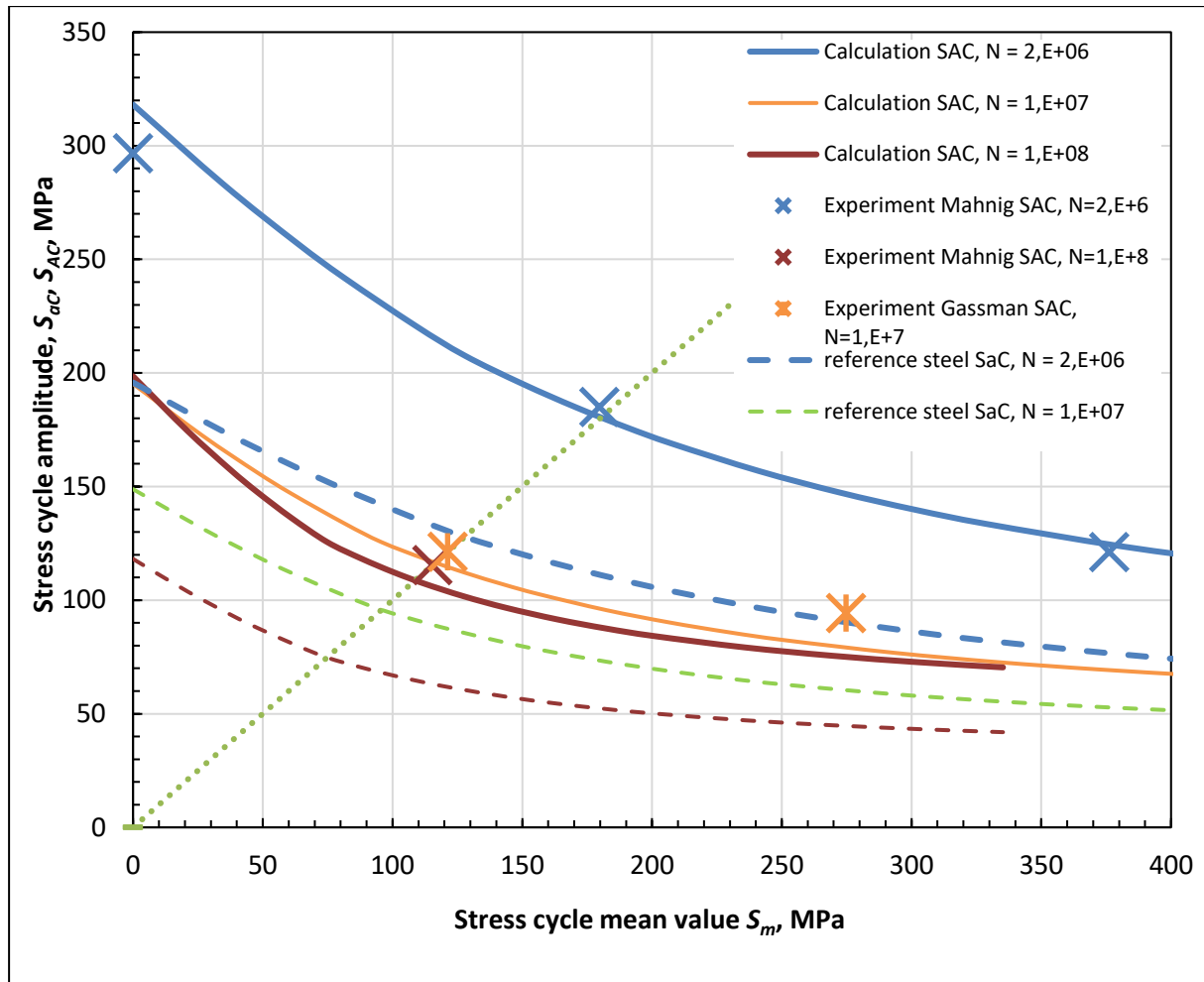


Figure 4: Calculated Haigh diagram of a large bended specimen in water

## Conclusion

The statistical, geometrical and technological effect of the size and the decisive importance of the application of the Weibull distribution in the corrosion fatigue of steel castings 13%Cr-4%Ni are analyzed. Formulae describing size effects are derived. The scale parameters value of the Weibull distribution depending loading on both cycle number and corrosion fatigue strength amplitude are presented. The technological size factor is quantified for smooth reference specimens for variable cast thickness. The values of the parameters of linear relation describing the geometrical size effect on corrosion fatigue strength are also given.

Experimental Haigh diagram and calculated Haigh diagram of a large notched specimen loaded in water was used for verification of the calculation approach. Coincidence of calculated and experimental corrosion fatigue strength is significant. The fundamental significance of the technological and statistical size effects on the corrosion fatigue strength of large notched specimens was found, while the geometrical size effect is marginal.

Corrosion fatigue strength  $S_{ACmax}$  for the given number of load cycles  $N$ , mean stress  $S_m$ , thickness  $t$  and reliability  $R$  of a notched part made from 13%Cr-4%Ni cast steel with corrosion fatigue strength described by Haigh diagram of the smooth specimens  $S_{ac}(N, S_m, R = 0.5)$  can be estimated by the symbolic equation:

$$S_{ACmax}(N, S_m, R) = k_s \cdot RF(c, R) \cdot TSF(t) \cdot SSF(c, A_{ref}, A) \cdot GSF(\kappa) \cdot S_{ac}(N, S_m, A_{ref}, R = 0.5). \quad (15)$$



The reported size effects on the corrosion fatigue strength can be recommended for reliability assessment of water turbine parts.

### References

- [1] VESELÝ, J. - VARNER, M. A. Case Study of Upgrading of 62.5MW Pelton Turbine. In: *International Conference IAHR 2001*. Praha, October 2001.
- [2] BABAČENKO, V. E. Koroziionno – ustalostnaja pročnost lopastej PL gidroturbin, *Energomašinstrojenie*, 1975, no. 7, p. 16-18.
- [3] ANGERN, R. Safety Engineering for the 423 MW-Pelton-Runners at Bieudron, In: *20th IAHR Symposium, August 6-9, 2000*. Charlotte, N.C. USA.
- [4] KLESNIL, M. - LUKÁŠ, P. Fatigue of Metallic Material. *Elsevier*, NY, 1992.
- [5] VARNER, M. Electrochemical measurement in incubation stage of corrosion fatigue life of supermartensitic steel in aqueous solution with chlorides. In: *4th International Conference Corrosion 2005*. Brno: FME TU Brno, 2005. (in Czech)
- [6] VARNER, M. - KOULA, V. - KANICKÝ, V. Contribution to corrosion fatigue crack initiation modeling. In: *3rd International. Conference Materials Structure & Micromechanics of Fracture*. Brno: FME TU Brno, 2001, CD ROM.
- [7] TAKASHI, K. – OSAMU, T. Recent Quality Control of 13Cr-4Ni Cast Steel Runner. *Fuji Electric Review*, 1984, vol. 30, no. 4.
- [8] BARP, P. - KELLER, A. - MÜLLER, H. Some result of fatigue tests on steels containing 13% Chromium. In: *7th Symposium of the International Association for Hydraulic Research*. Vienna, 1974.
- [9] GESSMANN, H. Über Dauerfestigkeit und Kerbempfindlichkeit des rostfrei Stahlgusses unter Korrosionseinfluß. *ÖZO*, Dezember 1992, Jg. 45, Heft 12, p. 534-543.
- [10] SONSINO, C. M. - DIETERICH, K. Korrosionsschwingfestigkeit der Stahlgussorten GX5CrNi134 und G-X5CrNi174 für Laufräder von Wasserkraftmaschinen und Pumpen. *Werkstoffe und Korrosion*, vol. 41, no. 6, June 1990, p. 330-342.
- [11] MAHNIG, F. - RIST, A. - WALTER, H. Strength and mechanical fracture behaviour of cast steel for turbine. *Water Power*, 1974, vol. 26, no. 10, p. 343-347.
- [12] DIEMAR, A. - THUMSER, R. - BERGMANN, J. Determination of local characteristics for the application of the Weakest-Link Model. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2005, vol. 36, no. 5, p. 204-210
- [13] SHIGLEY, J. E. - MISCHKE, CH. R. - BUDYNAS, R. G. *Mechanical Engineering design*. The McGraw Companies, 2010.



# INOVACE PROCESU NÁVRHU ZPĚTNÝCH ODBĚROVÝCH KLAPEK S VYUŽITÍM DIGITALIZACE

## INNOVATION OF THE BLEED CHECK VALVE DESIGN PROCESS BASED ON DIGITAL TWIN APPLICATION

Jan Blažek <sup>a)</sup>, Jan Sladký <sup>a)</sup> a Stanislav Plánička <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> TechConcept s.r.o.

<sup>b)</sup> Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky

### Abstrakt

Pro ochranu turbíny před zpětným prouděním páry se na odběrová potrubí instalují zpětné klapky. V souladu s trendem provozování energetických zdrojů ve stále větším rozsahu provozních parametrů a snahou minimalizovat energetické ztráty, je nezbytné, aby zpětné odběrové klapky byly navrhovány pro definovaný rozsah provozních parametrů, tedy na míru.

Inovace procesu návrhu spočívá ve tvorbě digitálního dvojčete klapky. Datový list slouží pro analytický návrh geometrie a výpočet charakteristik klapky. Navazující parametrický model umožňuje tvorbu 3D modelu na míru, provedení kontrolního pevnostního výpočtu a zpracování výrobní výkresové dokumentace.

### Abstract

In order to protect the turbine from steam backflow, check valves are installed on the bleed piping. In accordance with the trend of an increasingly larger range of operating conditions and required minimum energy losses, it is necessary to design check bleed valves for a defined range of operating parameters, i.e., tailor-made.

The innovation of the design process is based on digital twin. The data sheet is used for the analytical design of the geometry and check valve characteristics calculations. The subsequent digital parametric model allows the fast design of the customized 3D model, check stress analysis, and generation of detailed design drawings.

## 1 Úvod

Inovace procesu návrhu, optimalizace vybraných konstrukčních uzlů vychází ze stávajících ověřených konstrukčních řešení a metodik [1, 2].

Zpětná odběrová klapka je specifický druh zpětné armatury, která se instaluje do potrubí parních odběrů turbíny. Hlavní funkcí je ochrana turbíny a zamezení zpětného proudění pracovního média při nenadálých stavech nebo poruchách. Primární funkce je samočinné uzavření vlivem tíhové síly.

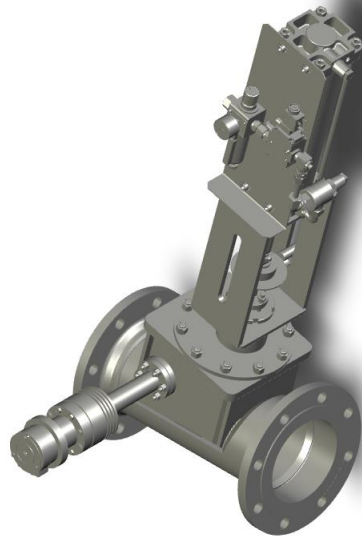
### 1.1 Konstrukční řešení

V závislosti na způsobu a podmínkách aplikace mohou být na klapky kladeny další požadavky, které mají za následek specifická řešení, variantní vybavení dalšími prvky:

- pohon shora/z boku pro zajištění talíře v uzavřené poloze,
- lokální/dálkové kontinuální snímání polohy talíře,
- interní/externí závaží působící při otevírání/zavírání klapky,
- tlumič působící při otevírání/zavírání klapky.

Rozsah velikostí je dle průměru potrubní trasy DN100 – DN2000. Hlavní konstrukční uzly zpětné odběrové klapky typu „swing“ jsou svařenec tělesa včetně sedla, víko a stojánek, talíř uložený na hřídeli, který se nachází nad průtočným kanálem, kontinuální snímání polohy talíře,

pohon, případně závaží, tlumič. Funkce zpětné odběrové klapky je ochranná, cílem není regulovat průtok či redukovat tlak média, proto je kladen důraz na provedení průtočného kanálu, tedy vnitřních částí tak, aby klapky dosahovaly nejmenší možné tlakové ztráty.



Obr. 1: Zpětná odběrová klapka typu swing s pohonem shora a ukazatelem polohy

### 1.2 Stanovení polohy talíře

Přesná poloha talíře v závislosti na provozních charakteristikách je stanovena na základě metodik [1, 2]. Není-li návrh proveden vhodně, může docházet k nestabilním jevům, například dynamickému dosedání a odsedání talíře na a od sedla, které je doprovázeno nežádoucími akustickými emisemi, zvýšeným opotřebením. Znalost úhlu otevření talíře je dále nezbytná pro stanovení tlakové ztráty zpětné odběrové klapky.

Rovnice (1) pro stanovení polohy talíře vychází z momentové podmínky rovnováhy k ose hřídele, obr. 2, kde celkový hydrodynamický moment je dán součtem momentu vyvolaného rychlostí média dopadajícího na plochu talíře v průtočném kanálu a momentu od nerovnoměrného rozložení tlaku v okolí talíře. V rovnovážném stavu je velikost tohoto výsledného momentu rovna velikosti momentu vyvolaného vlastní tíhou efektivní hmoty talíře a jeho ramene. Rovnice lze také přepsat do tvaru (2), ve kterém lze separovat a kvantifikovat charakteristiky proudění od charakteristik zpětné odběrové klapky.

$$M_H = M_V + M_P = M_W \quad (1)$$

$$K_H D^3 \rho_f v_S^2 = (K_V + K_P) \rho_f v_S^2 = K_W \quad (2)$$





Výsledky výpočtu a měření tlakové ztráty v závislosti na úhlu otevření talíře vykazovaly shodu s relativní přesností do 3 %. Analytická metoda stanovení tlakové ztráty byla na základě provedených validovaných simulací zpřesněna a nabízí méně konzervativní hodnoty. Výpočtový CFD model lze použít pro validaci analytických výpočtů tlakové ztráty pro další rozměrotypy zpětné odběrové klapky.

## 2.2 Optimalizace konstrukce

Na základě konstrukčních, výrobních a provozních kritérií byly optimalizovány následující konstrukční uzly:

- svařenec tělesa včetně sedla,
- talíře a hřídele,
- víka a stojánku pohonu,
- kontinuální snímání polohy talíře.

## 2.3 Parametrický model

Na základě datového listu a optimalizace konstrukčních uzlů byl připraven úplný 3D model zpětné odběrové klapky typu „swing“. Model byl parametrizován s ohledem na hlavní myšlenku procesu inovace, tedy řešení na míru. V návaznosti na parametrický model byla připravena i automatická tvorba dvojčete pro kontrolní pevnostní výpočet a tvorba výkresové dokumentace, která vyžaduje jen minimální zásah konstruktéra.

Připravený parametrický model a dokumentace umožňuje velmi snadno a efektivně navrhovat a připravovat výkresovou dokumentaci zpětných odběrových klapek všech dimenzí, tlakoteplotních stupňů a materiálů dle evropských i amerických norem při zachování flexibility změny návrhu.

## 3 Prototyp a experimentální ověření

V poslední fázi byl vyroben kovový prototyp zpětné odběrové klapky DN150 PN16 a tlakovací přípravky pro tlakové a těsnostní zkoušky různých rozměrotypů. Prototyp zpětné odběrové klapky byl poté ve firmě Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. podroben experimentálnímu ověření funkčnosti na vzduchu vzhledem k požadavkům zákazníka, které jsou na zařízení kladeny (úplné dovření talíře, zajištění talíře pohonem, aktivace pohonu do 2 s, lokální a dálkový ukazatel polohy apod.) [7]. Dále byly experimentálně ověřeny analyticky stanovené charakteristiky, zejména závislost otevření talíře na průtočném množství a závislost součinitele tlakové ztráty na otevření klapky, obr. 5. Analyticky stanovené parametry vykazují vysokou míru shody s experimentálně naměřenými hodnotami, obr. 6. Při pozorování polohy talíře při otevírání a zavírání klapky v závislosti na průtočném množství byla sledována hystereze, tj. při stejném průtočném množství byla pozorována odlišná poloha talíře při otevírání a zavírání. Hysterezní chování zařízení lze vysvětlit třením v uložení hřídele v tělese klapky i dynamikou procesu.

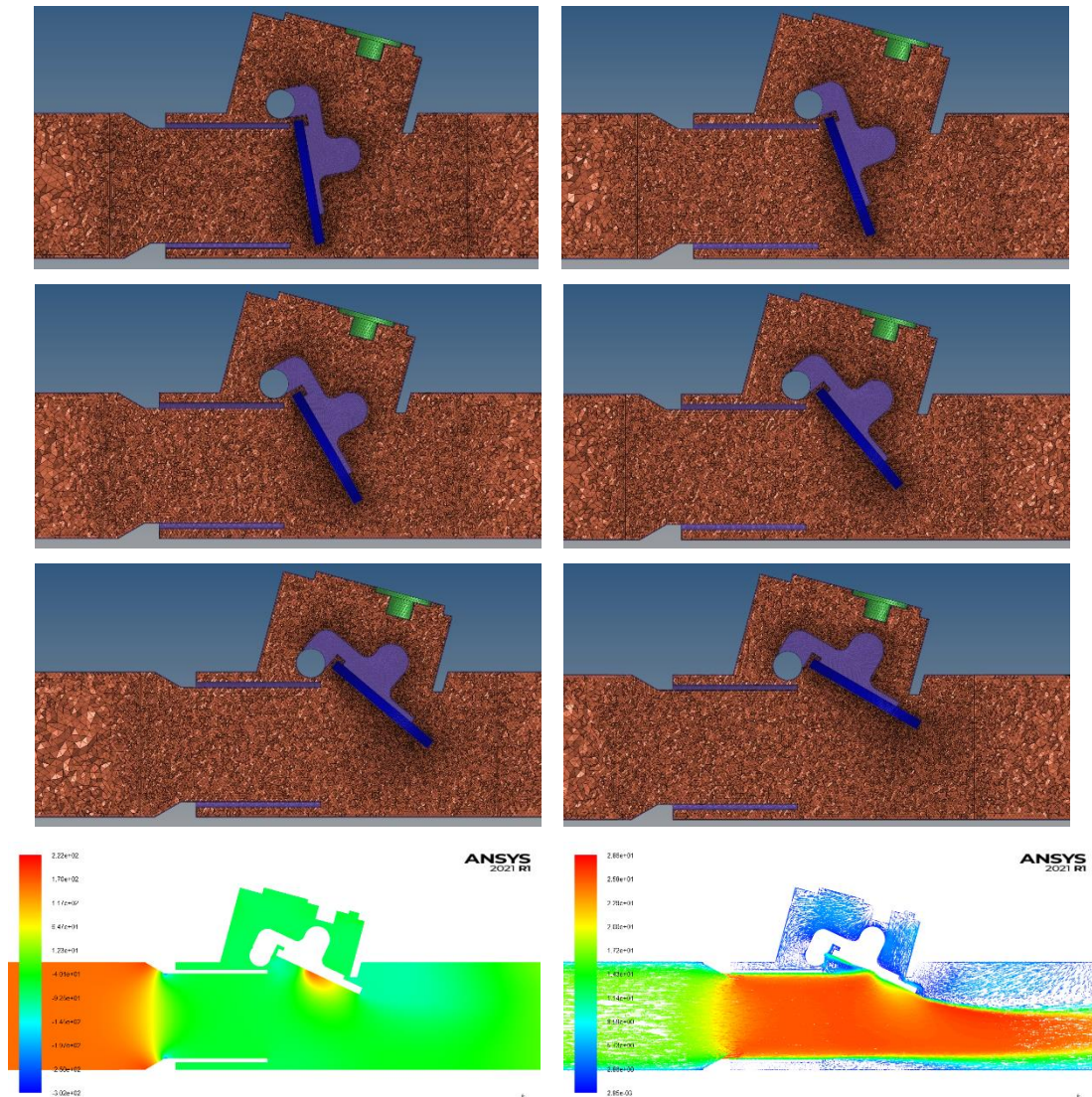
## 4 Závěr

Inovovaný proces návrhu zpětné odběrové klapky typu „swing“ je založen na tvorbě digitálního dvojčete. Datový list na základě požadovaného rozsahu provozních charakteristik prostřednictvím analytických výpočtů definuje řídicí parametry pro konstrukční návrh. Konstrukční návrh je realizován na základě parametrického modelu. Na základě řídicích parametrů z datového listu jsou automaticky generovány dílčí podsestavy, výkresová dokumentace, výpočtový model pro pevnostní analýzu.

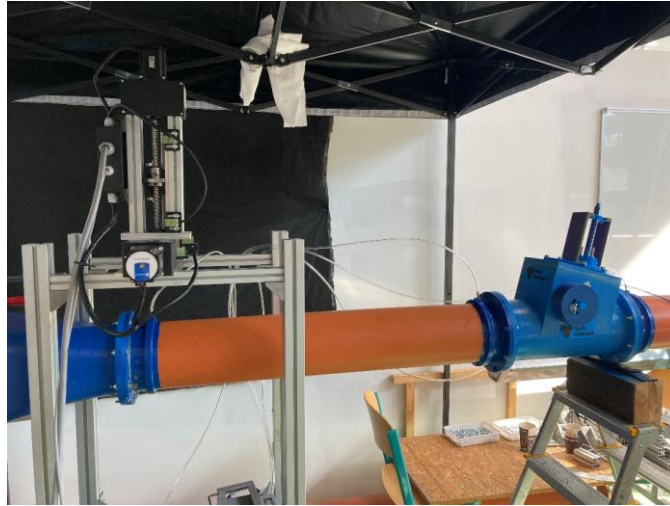
Zpřesnění metodiky pro stanovení součinitele tlakové ztráty bylo provedeno na základě výpočtů proudění validovaných experimentem na plastovém prototypu klapky DN150. Analytické stanovení tlakové ztráty, otevření talíře v závislosti na průtočném množství bylo experimentálně ověřeno při funkčních zkouškách kovového prototypu klapky DN150 PN16 na vzduchu. V průběhu inovačního procesu byly optimalizovány vybrané konstrukční uzly, které

zohledňují návrh klapky na míru, zlepšují funkční charakteristiky klapky, případně přináší úsporu při výrobě.

Projekt byl podpořen z programu The Country for the Future, poskytovatelem veřejné podpory bylo Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Projekt byl dokončen za spolupráce s Katedrou mechaniky, FAV, ZČU v Plzni, Katedrou energetických strojů a zařízení, FST, ZČU v Plzni a Výzkumným a zkušebním leteckým ústavem a.s. Děkujeme za podporu a spolupráci.



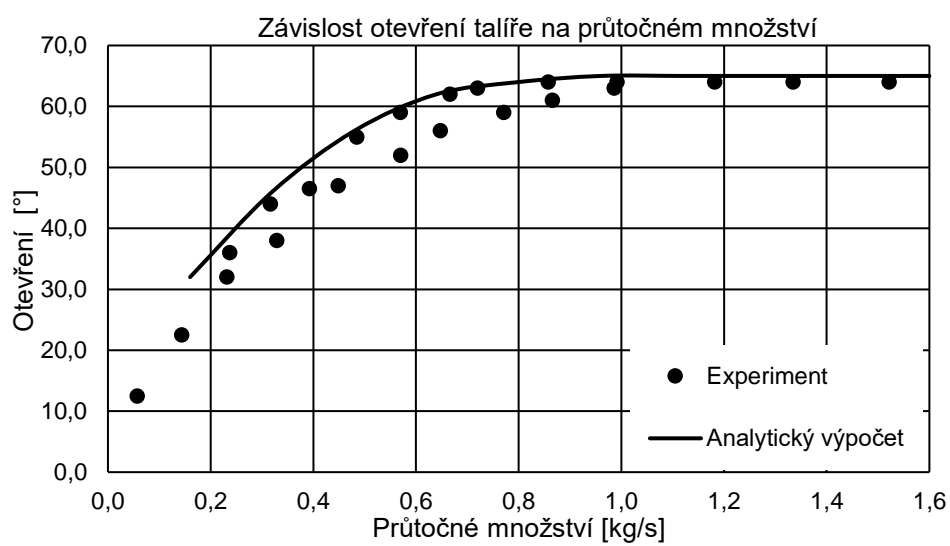
Obr. 3: Byly provedeny numerické simulace proudění odpovídající stavům s otevřením talíře po 10°. Ukázka použití nestrukturované výpočetní sítě (nahore), rozložení tlaku a vektorové rychlostní pole pro maximální otevření (dole).



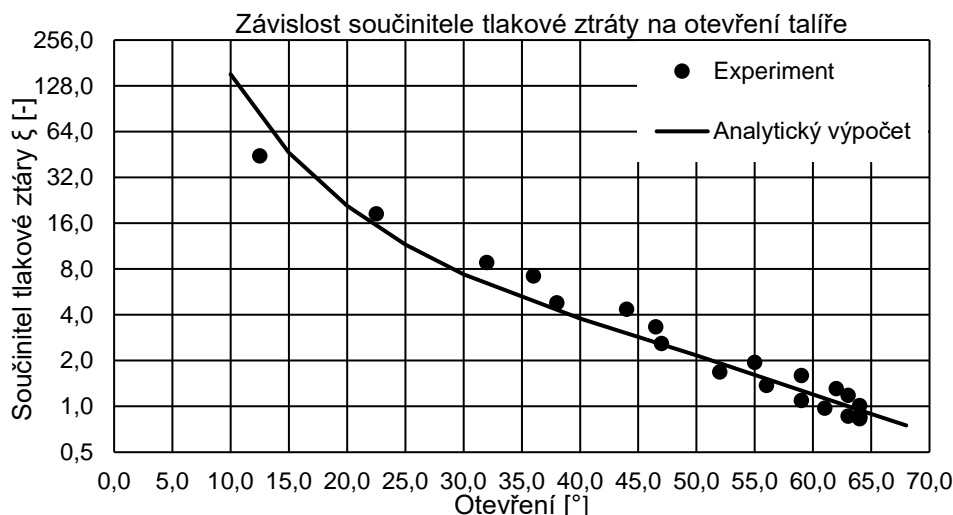
Obr. 4: Plastový prototyp klapky byl pro experimentální měření doplněn o přípravek umožňující aretaci talíře



Obr. 5: Prototyp zpětné klapky byl prověřen ve Výzkumném a zkušební leteckém ústavu



Obr. 6: Závislost otevření talíře na průtočném množství při měření prototypu



Obr. 7: Závislost součinitele tlakové ztráty na otevření talíře prototypu

### Literatura

- [1] RAHMEYER, W.J. Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits. *Journal of Pressure Vessel Technology*, November 1993, vol. 115, issue 4, p. 406-410, doi: 10.1115/1.2929548.
- [2] BOTROS, K.K. - JONES, B.J. - ROORDA, O. Effects of Compressibility on Flow Characteristics and Dynamics of Swing Check Valves. Part I. *Journal of Pressure Vessel Technology*, May 1997, vol. 119, issue 2, p. 192-198, doi: 10.1115/1.2842283.
- [3] IDELCHIK, I.E. *Handbook of Hydraulic Resistance, 4th Edition Revised and Augmented*. Begell House, Danbury, 2008. 861 p. ISBN 978-1-56700-340-6.
- [4] KOLÁŘ, Václav a VINOPAL, Stanislav. *Hydraulika průmyslových armatur: příručka praktických výpočtů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. 650 s. ISBN 978-1-56700-340-6.
- [5] VIMMR, Jan, PLÁNIČKA, Stanislav a JONÁŠOVÁ, Alena. *Vývoj pokročilé metodiky pro stanovení průtočných charakteristik zpětné odběrové klapky u parního turbosoustrojí*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, září 2022, souhrnná výzkumná zpráva, NTIS-VP3-010/2022.
- [6] URUBA, Václav, TSYMBALYUK, Volodymyr a YANOVYCH, Vitalii. *Měření tlakové ztráty na modelu zpětné klapky*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, říjen 2022, technická zpráva, KKE-05-22.
- [7] NĚMEC, Martin a JELÍNEK, Tomáš. *Měření tlakové ztráty zpětné odběrové klapky TechConcept DN150*. Praha, prosinec 2022, technická zpráva, P-DAV-IVA-004-22.





## POTRUBNÍ HERMETICKÉ PRŮCHODKY

### HERMETIC PIPE PENETRATIONS

Martin Pulc

ŠKODA JS a.s.

#### Abstrakt

Potrubní hermetické průchodky zabezpečují hermetičnost mezi dvěma oddělenými stavebními prostory při průchodu potrubní trasy stěnou. Plní funkci požárně odolné konstrukce, snižuje průchod ionizujícího záření a v rámci potrubní trasy tvoří pevné uložení. Původní konstrukční řešení (dle dříve platných Technických podmínek) ale neumožňuje provozní kontrolu tlakově namáhaného svaru mezi hlavicí a průtočnou trubkou a u horkých průchodek způsobuje nevhodný tvar hlavice vysoká teplotní napětí. Nově představené konstrukční řešení (kompatibilní s již existujícími zabudovanými stavebními díly) odstraňuje výše uvedené nevýhody dosavadního řešení, umožňuje přizpůsobit tuhost průchodky potřebám navazujícího potrubí, a navíc umožňuje průběžnou kontrolu těsnosti přípojovacích svarů, dříve nepřístupných. V tomto příspěvku je popsána historie vývoje v ČR a ve světě – a především je poprvé oficiálně představeno nové technické řešení odborné veřejnosti, a to u příležitosti konference v Srní. ČEZ ETE a EDU byla schválena nová revize Technických podmínek s využitím těchto nových konstrukčních řešení, které jsou chráněny užitným vzorem č.37126.

#### Abstract

Hermetic pipe penetrations ensure hermeticity between two separate construction spaces when the pipe route passes through the wall. They act as a fire-resistant structure, reduce the passage of ionising radiation and form a fixed anchoring for the pipe line. However, the original design (according to the previous revision of Technical Conditions) does not allow operational inspection of the pressure-stressed weld between the head and the flow pipe. For hot penetrations, the unsuitable shape of the head causes high thermal stresses. The newly introduced design solution (compatible with existing built-in components) eliminates the disadvantages mentioned above of the existing solution, allows to adapt the rigidity of the penetrations to the needs of the downstream pipe, and, in addition, allows continuous inspection of the tightness of the connection welds that were previously inaccessible. In this presentation, the history of development in the Czech Republic and worldwide is described - and above all, the new technical solution is officially presented to the professional public for the first time on the occasion of a conference in Srní. CEZ ETE and EDU approved a new revision of the Technical Conditions using these new design solutions protected by utility model No. 37126.

#### Úvod, funkce hermetických průchodek

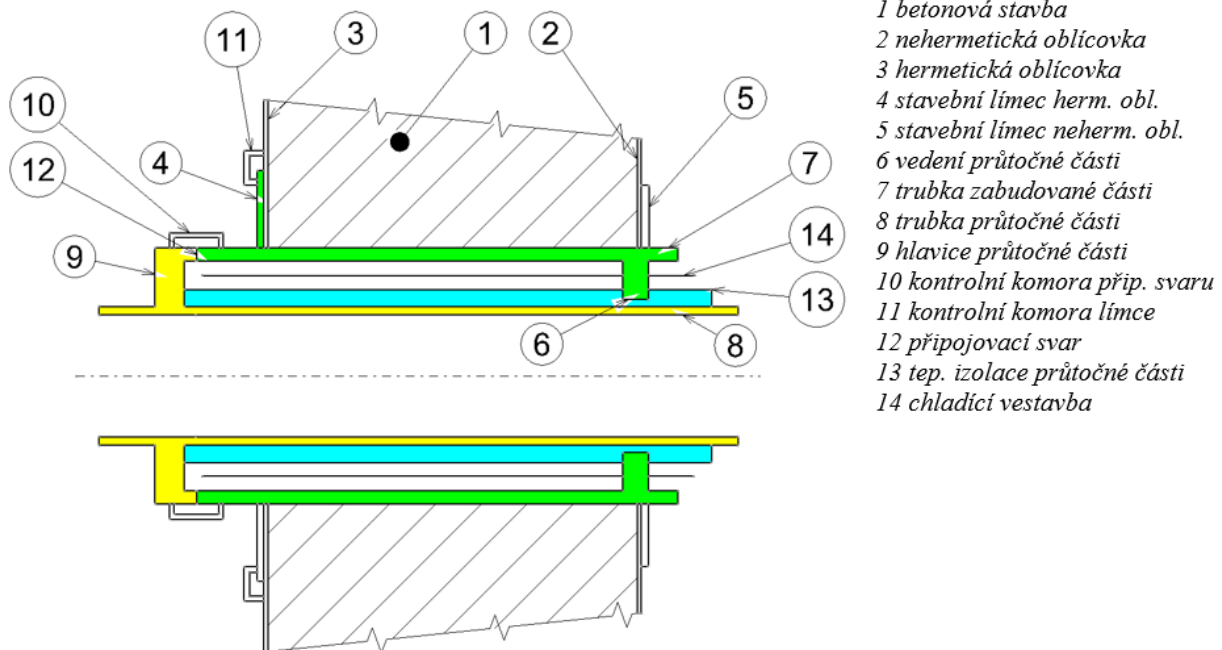
Každá jaderná elektrárna se stavebně skládá z hermetické a nehermetické části. Hermetická část tvoří ochrannou obálku všech technologií, které potenciálně obsahují radioaktivní média. Mezi hermetickou a nehermetickou částí však prochází přes hermetickou obálku oběma směry mimo jiné mnoho potrubních systémů za pomoci potrubních hermetických průchodek. Hermetické průchodky mají zabudovanou část (ta se pevně zabudovává do stavby) a průtočnou část, která je součástí potrubní trasy. Obě části jsou dodávkou strojní technologie.

Potrubní hermetické průchodky mají především následující funkce:

- Zabezpečení hermetičnosti mezi dvěma oddělenými stavebními prostory při průchodu potrubní trasy stěnou, která odděluje hermetickou a nehermetickou část stavby. Z tohoto důvodu je průchodka klasifikována jako BT2 dle Vyhl. 329/217 Sb.
- Její využití jako pevného uložení potrubí v rámci potrubní trasy, resp. pevný bod, který přenáší silové a momentové zatížení mezi potrubím a stavbou.



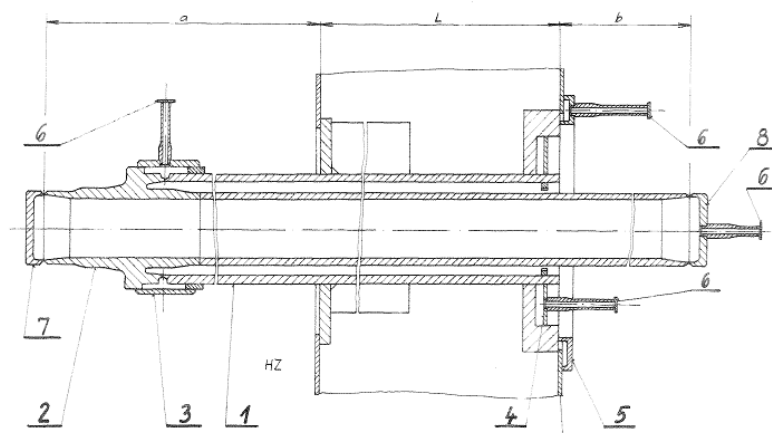
- Průchodky musí zůstat neporušeny a hermeticky těsné i při namáháních, která mohou vzniknout při roztržení potrubí.
- Snížení průchodu ionizujícího záření z hermetické do nehermetické části nebo umístění průchodek tak, aby se minimalizovala expozice v části mimo HZ.
- Plnění funkce požárního oddělení úseků (požárně odolná konstrukce).
- Pro horké potrubní systémy snížení přestupu tepla do stavební konstrukce (pomocí izolace a aktivního nebo pasivního chlazení vzduchem).
- Připojovací svary musí být doplněny komorami pro periodickou nebo kontinuální zkoušku těsnosti.



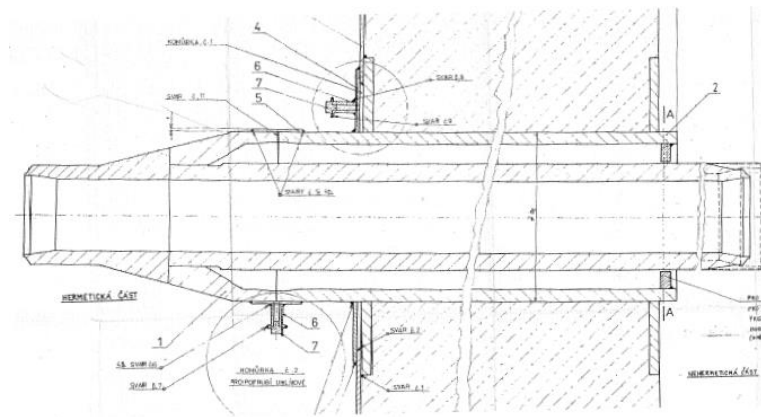
Obr. 1: Obecné schéma hermetické potrubní průchodky s rozdělením na hlavní části: zelená – zabudovaná část, žlutá – průtočná část, modrá – tepelná izolace v rámci chladičí vestavby (pouze u průchodek s teplotou média nad 100 °C)

### Popis současných technických řešení

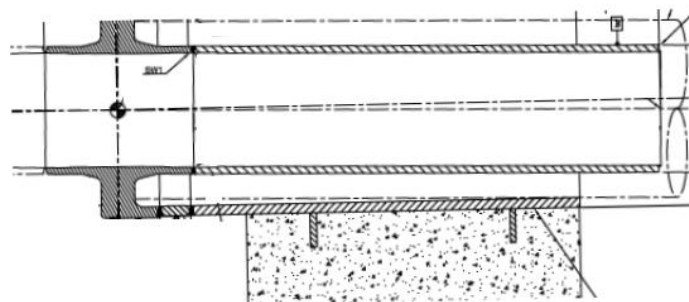
Na elektrárnách se vyskytují různá technická řešení hermetických průchodek, viz obr. 2 až obr. 4.



Obr. 2: Hermetická průchodka ve VVER440



Obr. 3: Hermetická průchodka ve VVER1000

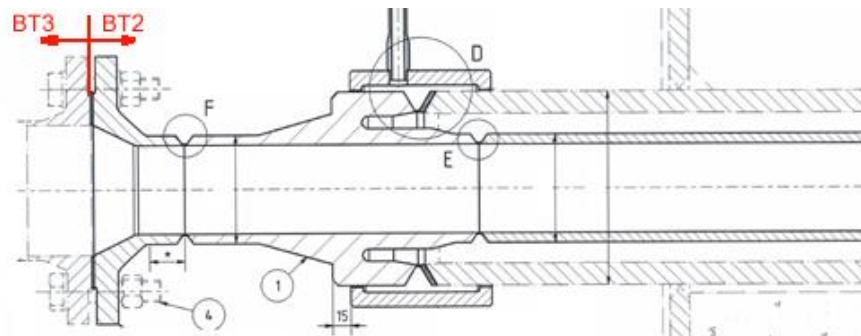


Obr. 4: Hermetická průchodka v EPR

### Návrh hermetické průchodky

Na hermetickou potrubní průchodku je vhodné nahlížet jako na jakýkoli konstrukční díl a neomezovat se jen na původní řešení. Existuje mnoho okrajových podmínek, které je třeba zohlednit:

- a) zda jde o průchodku, která bude montovaná do nové stavby, nebo zda jde o nově doplňovanou průchodku do stávající stavby – zde musejí být součástí sestavy hrdla pro tlakové lití lepicího tmelu;
- b) zda se hermetická obličovka nachází na hermetické nebo v nehermetické straně stavby (z důvodu umístění komor mezi přípojovacím svarem límce a obličovky);
- c) stavební (zabudovaná) část je standardně z uhlíkové oceli, ale průtočná část může být z uhlíkové, nebo nerezové oceli. Pokud jsou materiály rozdílné, pak je třeba technologicky ošetřit heterogenní svarový spoj mezi hlavicí a zabudovanou částí;
- d) z hlediska orientace může být průchodka svislá, nebo vodorovná;
- e) průchodkou může procházet 1 nebo více potrubí (typicky impulzní trubičky odběrů tlaku);
- f) zda by měla průchodka z pevnostního hlediska navazující potrubní trasy být co nejtuzší, nebo zda by měla v místě hlavice umožňovat tuhost snížit (pomocí tvarové hlavice);
- g) souvisí s předchozím bodem – zda jde u průchodku, kde proudí „studené“ nebo „horké“ médium;
- h) každý svar, který zajišťuje hermetičnost – musí být jednoduše kontrolovatelný pomocí tlakové zkoušky (pomocí přípojovacích hrdel na kontrolních komorách);
- i) způsob připojení průchodky k navazujícímu potrubí (svar, nebo přírubový spoj).

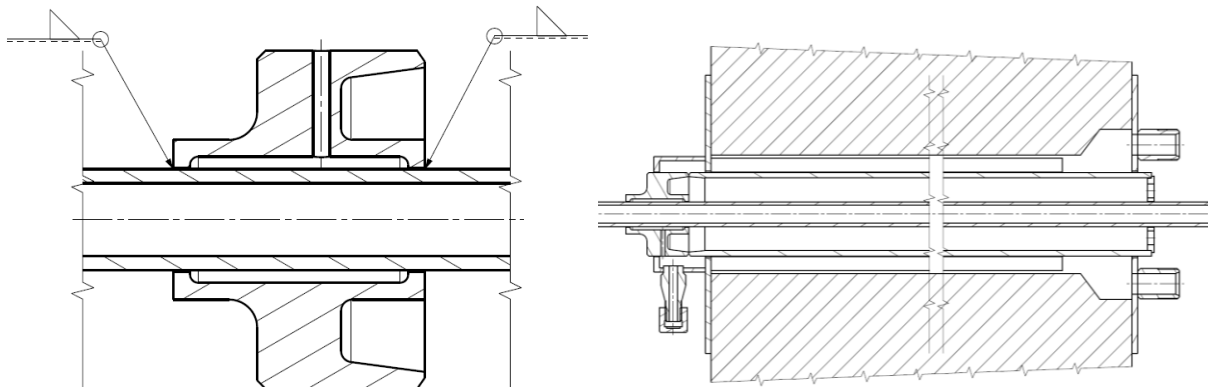


Obr. 5: Návrh hermetické průchodky

### Popis nového konstrukčního řešení

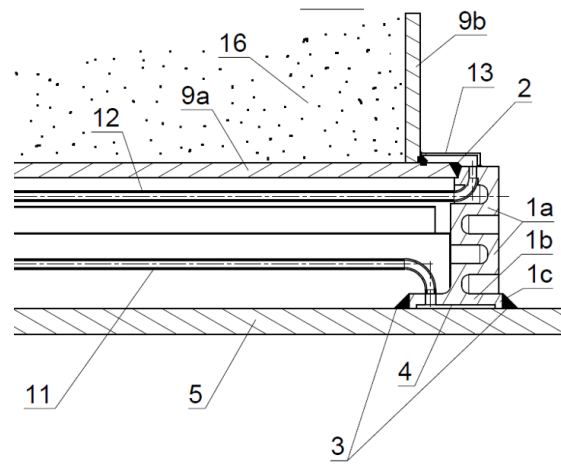
Nové vydání technických podmínek „Průchodky potrubní hermetické“ pod označením ČEZ\_TPE\_10-40/1693/2023-B Rev.00 již není koncipováno jako „soupis sestavných výkresů pro jednotlivé typorozměry“, ale dává netradičně návod, jak přistupovat k jednotlivým konstrukčním uzlům z hlediska konstrukčního návrhu, jak postupovat z pohledu pevnostních výpočtů a v neposlední řadě, jak řešit požadavky legislativní.

Nové konstrukční řešení spočívá především v odlišném tvaru hlavice, kdy spojení průtočné trubky s hlavicí je realizováno dvěma koutovými svary mezi průtočnou trubkou, která prochází hlavicí – a tedy oba koutové svary nejsou ve styku s protékajícím médiem a nejsou namáhané tlakem média. Těsnost těchto svarů je kontrolována pomocí integrované komory. U tohoto konstrukčního řešení tedy odpadají problémy s nemožností jeho kontroly a případnou netěsností tlakového obvodového přípojovacího svaru mezi hlavicí a průtočnou trubkou.



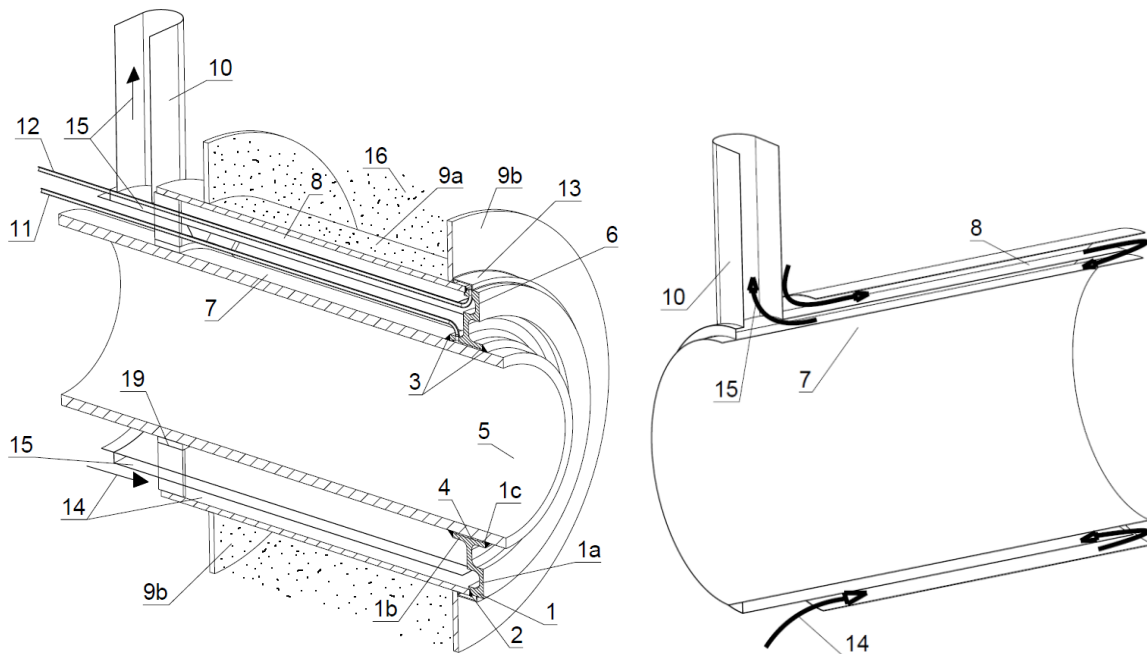
Obr. 6: Nové konstrukční řešení hermetické průchodky

Dále je nově možné pomocí tvaru hlavice přizpůsobit ohybovou tuhost v místě připojení průtočné trubky. Dále je patrné – že u tohoto řešení je možné vyvést kontrolu těsnosti přípojovacích svarů mimo HZ (tedy je možno tuto kontrolu provádět i kontinuálně).



Obr. 7: Nové konstrukční řešení hermetické průchodky

U průchodek s teplotou média nad 100 °C je potřebné do průchodky doplnit nejenom tepelnou izolaci, ale často vnější plášť průchodky ještě chladit vzduchem, a to buď aktivně přívodem NT vzduchu, nebo pasivně.



Obr. 8: Vnější plášť nového konstrukčního řešení hermetické průchodky



## **PRODUKTY ŠKODA JS A.S. PRO ELEKTRÁRNY TYPU VVER A HODNOCENÍ PROVOZNÍCH ZKUŠENOSTÍ**

### **ŠKODA JS A.S. PRODUCTS FOR VVER POWER PLANTS AND EVALUATION OF OPERATING EXPERIENCE**

Miloslav Ruchař

ŠKODA JS a.s., Divize D3 Jaderné zařízení, odbor Konstrukce

#### **Abstrakt**

Společnost ŠKODA JS a.s. dlouhodobě spolupracuje s firmou ČEZ, a. s. v oblasti servisu provozovaných reaktorových zařízení v České republice a zabývá se i procesem hodnocení provozních zkušeností. Díky tomu vzniká řada nových produktů, které usnadňují činnosti během odstávek provozovaných bloků, přispívají k vyšší bezpečnosti prováděných činností při respektování principů ALARA pro provozní personál a přispívají k udržení či zvyšování technické bezpečnosti zařízení. V příspěvku jsou uvedeny konkrétní zkušenosti z těchto oblastí.

#### **Abstract**

ŠKODA JS a.s. has long been cooperating with ČEZ, a. s. in the field of servicing reactor units in operation in the Czech Republic and is engaged in the process of evaluating operating experience. As a result, a number of new products are being developed that facilitate activities during shutdowns, contribute to higher safety of the activities performed while respecting the ALARA principles for personnel, and contribute to maintaining or improving the technical safety of the facilities. Specific experiences in these areas are presented in this paper.

#### **Úvod**

Během odstávek energetických bloků je potřeba zajistit velké množství různorodých činností, které mají zásadní význam jak na samotnou realizaci odstávky, tak na další bezpečný provoz bloku. Společnost ŠKODA JS a.s. se touto problematikou intenzivně zabývá již řadu let a díky zpětné vazbě z odstávek bloků navrhla a zrealizovala řadu nových zařízení a přípravků, které servisní činnosti významně ulehčují, zvyšují konečnou kvalitu provedených činností, nebo zvyšují bezpečnost prováděných činností během odstávek.

Tento příspěvek podrobně popisuje problematiku obsluhy přírubových spojů na víku tlakových nádob reaktorů typu VVER. Dále jsou zmíněna nová řešení, která zvyšují zabezpečení technologie reaktoru a bazénů skladování paliva během manipulací s hladinou vody v průběhu odstávek bloku. V závěru příspěvku jsou uvedeny některé zkušenosti z oblasti použití speciálních mazadel pro přírubové spoje na víku tlakových nádob reaktorů.

#### **Přehled nových řešení pro realizaci odstávek**

Na víkách obou typů reaktorů VVER-440 i VVER-1000 se nachází přírubové spoje pro připojení tlakových pouzder pohonů řídicích a regulačních orgánů reaktoru a dále přírubové spoje pro vyvedení vnitro reaktorových měření teploty a neutronového toku. Jejich počet i provedení se liší podle typu reaktoru, vždy je do určité míry spojuje obtížná přístupnost v konstrukci horního bloku reaktoru. V původním projektu byly tyto spoje těsněny na primární niklové těsnění, v případě použití tandemového sekundárního těsnění pak pomocí azbestové šňůry, jejich montáž i demontáž se prováděla buď pouze manuálně, nebo pomocí starší koncepce jednoduchých utahovacích jednotek s využitím hydrauliky.

V dnešní době ŠKODA JS a.s. u všech těchto spojů určených k pravidelné demontáži provedla projektovou změnu, kdy původní niklové těsnění i těsnění z azbestu nahradila těsněním z expandovaného grafitu. Změny typu těsnění byly provedeny bez nutnosti úprav těsnících



plach původních dílů reaktoru a byly ověřeny jak výpočtově, tak i pomocí zkoušek na stendo-  
vém zařízení imitujícím pracovní podmínky na reaktorovém zařízení. Výjimkou zůstal pouze  
spoj nátrubku víka reaktoru a tlakového pouzdra pohonu regulačního orgánu VVER-440, který  
byl koncepčně řešen bez nutnosti jeho rozebírání po dobu původní projektové životnosti reak-  
toru.

Díky změnám ve způsobu utěsnění rozebíratelných přírub došlo k významnému snížení po-  
žadovaných předepínacích sil svorníků, a tedy i ke snížení potřebných utahovacích momentů,  
což má pozitivní vliv nejen na jejich nižší únavové namáhání, ale nově umožňuje i automatizo-  
vat proces povolování a utahování spojů. Při menších utahovacích momentech tak lze do po-  
měrně malých zástavbových prostorů v okolí jednotlivých přírub navrhnout vhodné utahovací  
jednotky, které naše společnost nabízí pod typovým označením EZ. Tyto jednotky dotahují  
příruby momentově v poloautomatickém režimu, ve velmi krátkých časech, s minimálním ná-  
rokem na obsluhu, včetně provádění diagnostiky dotahovaných závitů.

Pro původně nerozebíratelný spoj nátrubku víka s tlakovým pouzdem pohonu na reaktoru  
VVER-440 pak s ohledem na současný trend prodloužení doby provozu bloku vznikly rovněž  
nové přípravy pro výrazné zjednodušení a zkvalitnění možnosti jeho demontáže za účelem  
kontroly stavu funkčních ploch dílů, a pro následnou montáž a zkoušky spoje po utěsnění.

Pro vyšší úroveň zabezpečení kontroly stavu hladiny chladiva primárního okruhu během  
odstávky bloku pak vznikly nové přípravy pro možnost provádění nezávislé dozorové kon-  
troly.

### **Utahování přírub víka reaktoru jednotkami řady EZ**

Vývoj první jednotky EZ začal už po roce 2000 a do komerčního provozu byla jako první  
nasazena jednotka označená EZ650 pro spoje pohonů regulačních orgánů na VVER-440. Zá-  
kazníkem byla tehdy JE Loviisa ve Finsku a díky velmi dobré referenci z jejího nasazení byla  
pro stejnou elektrárnu za dva roky dodána další jednotka typu EZ650 TK/KNI pro přírubové  
spoje vývodů měření teploty a neutronového toku v aktivní zóně reaktoru. Obě tyto jednotky  
umožňovali utahování i povolování přírub s řízeným utahovacím momentem do 650 Nm, s di-  
agnostikou stavu závitových částí před utažením a s kontrolou procesu formování grafitového  
těsnění v průběhu utahování. Tyto jednotky naše společnost i nadále průběžně modernizuje  
a v současnosti jsou kromě elektrárny Loviisa v provozu i na elektrárnách na Slovensku  
a v Maďarsku. Jednotky EZ650 a EZ650 TK/KNI byly úspěšným základem pro vznik dalších  
evolucí jednotek EZ pro přírubové spoje na víku reaktoru VVER-1000.

Prvním typem jednotky EZ pro elektrárnu VVER-1000 v lokalitě Temelín v České republice  
byla jednotka s označením EZ250. Jednalo se o univerzální utahovací jednotku určenou pro  
všechny 3 typy přírubových spojů na víku nádoby reaktoru VVER-1000 s maximálním mo-  
mentem utažení do 250 Nm. Na rozdíl od předchozích řad jednotek EZ však bylo nutné kon-  
strukčně vyřešit rozdíly přírub, tedy umožnit utahování až 12 ks svorníků a odtlačovacích  
šroubů M27 při jednom ustavení jednotky na přírubový spoj a současně pro svorníky kromě  
kontroly utahovacího momentu umožnit i výslednou kontrolu hodnoty jejich prodloužení.  
To znamenalo jednak doplnění manuálně ovládané převodovky pro nastavení toku utahovacího  
momentu na požadovanou část příruby, tak i doplnění systému měření prodloužení svorníků  
do utahovacích táhel. Výzvou bylo zvládnutí přesného měření prodloužení svorníku na hodnotu  
 $0,08 \pm 0,01$  mm ve vzdálenosti zhruba 3,5 m pod utahovací jednotkou, s vyloučením vlivu ro-  
tujícího táhla na přesnost měření. Řešení se podařilo úspěšně zvládnout i díky uložení měřících  
členů pomocí magnetických ložisek. Z vyhodnocení prvního nasazení bylo zřejmé, že oproti  
předchozí utahovací jednotce pracující na hydraulickém principu se při dotahování sady 30 ks  
přírubových spojů podařilo docílit celkovou úsporu času přibližně 12 hodin z kritické cesty  
odstávky oproti předchozí jednotce. Modernizace se dočkal i tento typ jednotky, kterou v sou-  
časnosti nabízíme jako nejmodernější řešení pod typovým označením EZ340.

Dalším typem jednotky EZ bylo provedení EZ600 pro dva bloky elektrárny VVER-1000 v lokalitě Tianwan v Číně. Zde na rozdíl od našich bloků VVER-1000 již nebyl požadavek na dotahování 12 ks svorníků a odtlačovacích šroubů M27 na jedno ustavení, příruby nátrubků víka mají vždy jen 6 ks svorníků. Odpadla tedy nutnost použití manuálně ovládané převodovky, a dokonce i potřeba měřit prodloužení svorníků. Zákazník však požadoval pro nás dosud nový mix parametrů na kontrolu úspěšného procesu dotažení. Předpis konkrétně vyžadoval cílový moment utažení všech svorníků v rozmezí 200–230 Nm, přičemž v závěrečné cyklu přetažení musel být garantovaný moment v každém svorníku 200–205 Nm a odklon pouzdra pohonu délky přibližně 3,5 m, utaženém na elastickém grafitovém těsnění, nesměl být v radiálním směru na jeho horním konci vyšší než 0,5 mm. Tyto požadavky si vynutily návrh nového systému průběžné kontroly polohy dotahovaného pouzdra i nové přepracování logiky řídicího SW jednotky. Poloha pouzdra byla nastavena jako hlavní řídicí veličina od samotného úvodu utahování tak, aby s rostoucí tuhostí těsnění během utahování byla udržována správná poloha pouzdra v zadané toleranci. Při zkouškách této jednotky se jako zcela zásadní projevil vliv správné přípravy dílů před montáží spoje, kdy pro minimalizaci rozdílů tření bylo potřeba odstranění i drobných záděr z dosedacích ploch matic a přírub a byla nutná správná aplikace mazadla závitů a třecích ploch. I zde se nám potvrdilo, že klíčový vliv už má samotná konstrukce přírubového spoje, kdy bez podložek pod maticemi vznikají zásadní rozdíly ve tření mezi maticemi a přírubou jednotlivých svorníků, a tedy se i významně liší účinnost přenosu kroutícího momentu na osovou sílu a prodloužení svorníků. I zde jsme si prakticky ověřili naši předchozí dílčí projektovou úpravu konstrukce přírub, kdy jsme k maticím doplnili integrované podložky a toto řešení jsme úspěšně nasadili do provozu na JE Temelín.



Obr. 1: Vlevo první jednotka EZ650 na JE Loviisa, vpravo nejnovější jednotka EZ340 při stendových zkouškách ve ŠKODA JS a.s.

### Utahování přírub na víku reaktoru VVER-440

Jak je zmíněno v předchozím textu příspěvku, i na víku reaktoru VVER-440 se u vývodů měření teploty a neutronového toku používají jednotky řady EZ. Samostatnou problematiku však tvoří přírubové spoje nátrubků víka a pouzder pohonů regulačních orgánů. Tyto přírubové

spoje na rozdíl od reaktoru VVER-1000 nejsou přístupné shora od horního bloku, ale pouze z bočního prostoru. Projekt reaktorového zařízení VVER-440 pro tyto příruby již v úvodu počítal rovnou s životností 30 let, jako pro celé reaktorové zařízení, tedy během pravidelných odstávek bloku nebylo nutné tyto příruby rozebírat.

Současný stav však zcela jasně nabízí využití značných projektových rezerv, a proto se i projektová životnost bloků VVER-440 prodlužuje nad původní projektový limit 30 let. To vyvolává i potřebu kontroly stavu a výměnu původních těsnění v těchto spojích.

ŠKODA JS a.s. proto v nedávné době vyvinula a otestovala řadu nových přípravků pro tyto spoje a od loňského roku se úspěšně používají na JE Dukovany. Konkrétně se jedná o přípravek pro řízený odtrh přírub při jejich demontáži, dále přípravek pro kontrolu polohy tlakového pouzdra pohonu před a po montáži, tlakovací přípravek na provedení dílčí tlakové zkoušky jednotlivých přírbových spojů po montáži i přípravek pro kontrolu těsnosti prostor mezi primárním a sekundárním těsněním přírbových spojů.

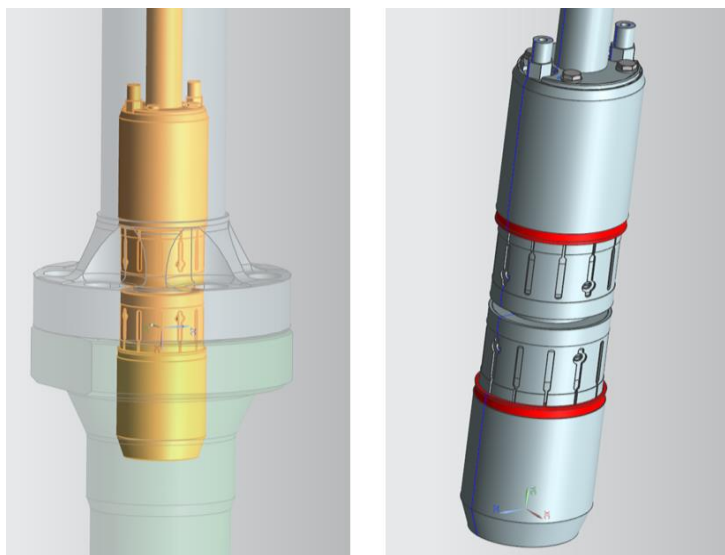
Přípravek pro odtrh se používá ke kontrolovanému vyvození osově síly, pomocí které dojde k oddělení a vysunutí pouzdra pohonu z nátrubku víka reaktoru bez rizika nekontrolovaného působení např. pomocí tahu jeřábu. Poloha pouzdra pohonu se ještě před odtrhem kontroluje pomocí přípravku pro měření náklonu, který při následné zpětné montáži vede operátora při střídavém postupu utavování svorníků tak, aby výsledná poloha pouzdra byla vůči původní pozici přesná a bez výrazných odchylek.



Obr. 2: Vlevo přípravek pro odtrh přírub, vpravo utahování přírub s kontrolou polohy

Po montáži spoje se používají přípravky na dílčí ověření jeho pevnosti a těsnosti. Pomocí prvního přípravku se provádí kontrola těsnosti meziprostoru primárního a sekundárního těsnění a jde o průkaz, že montáž i dotažení spoje jsou řádně provedeny pro jeho těsnost při provozních parametrech. Druhý přípravek (viz obr. 2) pak slouží k dílčí tlakové zkoušce vymezeného prostoru v těsné blízkosti kolem přírbového spoje a ověřuje pevnost a těsnost spoje po montáži. Hlavní výhodou řešení tohoto přípravku je, že oproti předchozímu řešení již nevyžaduje přítomnost operátora pod kontaminovanou plochou víka reaktoru během montáže přípravku.



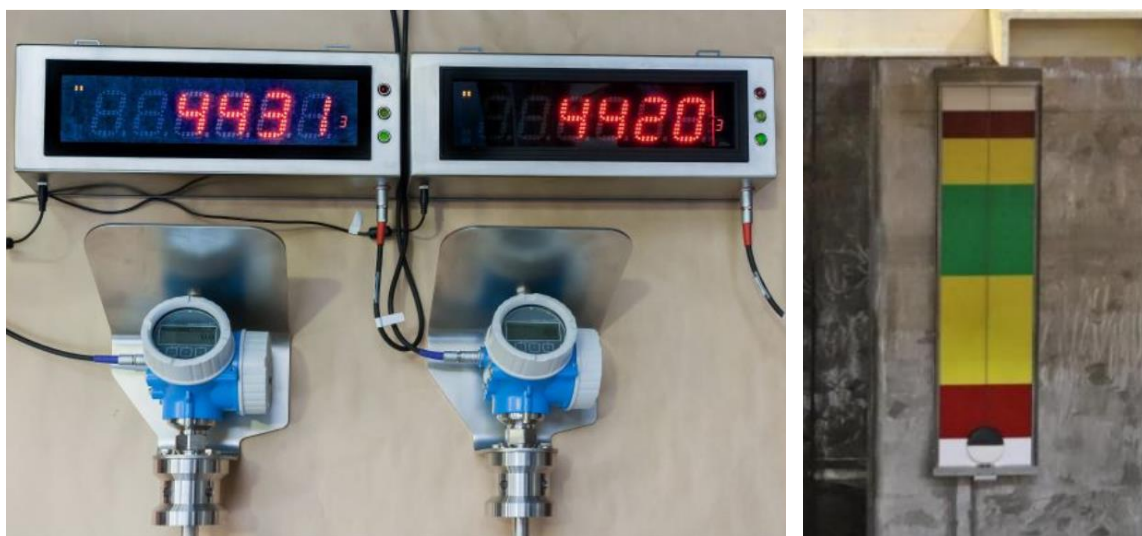


Obr. 3: Přípravek pro dílčí tlakovou zkoušku (veškerá montáž se provádí pouze shora)

Úspěšné provedení obou těchto tlakových a těsnostních zkoušek je nezbytná i s ohledem na výše vysvětlenou omezenou přístupnost těchto přírubových spojů a v případě potřeby je tak možné nevyhovující spoj přetěsnit ještě před ukončením odstávky a před najetím energetického bloku zpět na provozní parametry.

#### Zabezpečení kontroly hladiny chladiva I.O. během odstávky

V průběhu odstávky energetického bloku se provádí kontrolované manipulace s výškou hladiny chladiva primárního okruhu. Přitom je nutné dbát zvýšenou pozornost na další činnosti, při kterých jsou některé přírubové spoje na technologii roztěsněné. Pokud by při takových situacích chyběla dostatečná kontrola výšky hladiny, hrozilo by riziko přelítí technologie přes otevřené přírubové spoje. Společnost ŠKODA JS a.s. proto navrhla a dodala dva nezávislé systémy pro kontrolu stavu hladiny chladiva. První systém s označením MEHLAR slouží k průběžné kontrole výšky hladiny v pouzdrech pohonů regulačních orgánů a působí jako prevence proti přelítí bloku při jeho závěrečné montáži, plnění chladiva a odvzdušnění. Druhý systém je čistě pasivní plovákový indikátor výšky chladiva v bazénech skladování použitého jaderného paliva a umožňuje nezávislou nepřímou vizuální kontrolu výšky chladiva v bazénu pomocí dohledových kamer instalovaných na sále reaktorového bloku během odstávek.

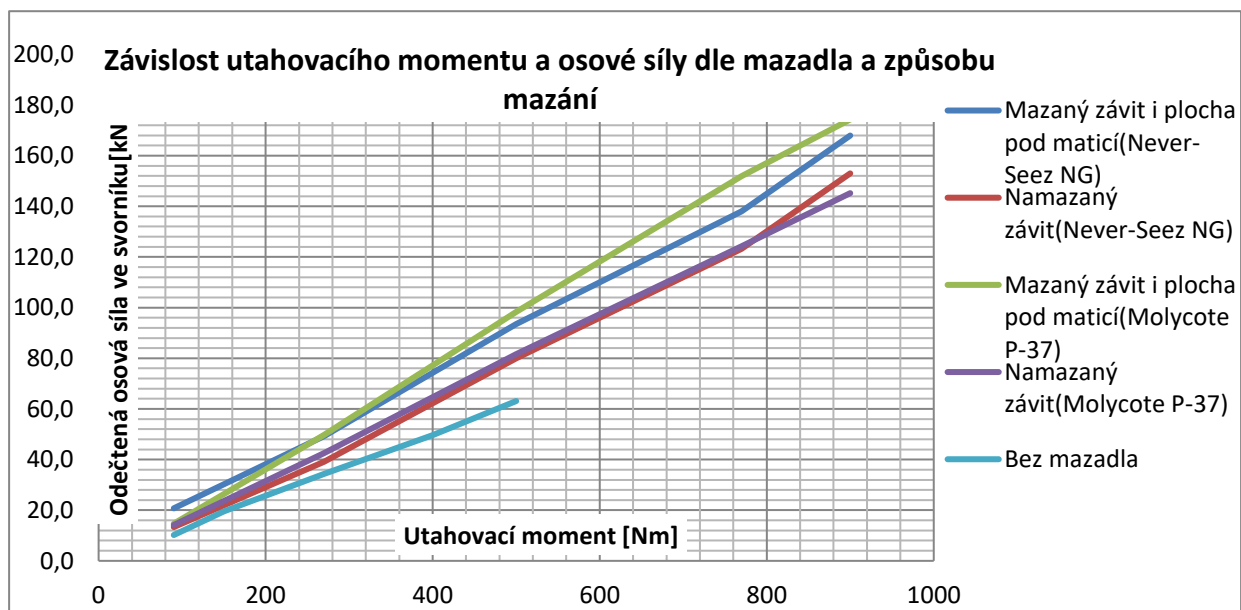


Obr. 4: Vlevo aktivní přípravek MEHLAR, vpravo pasivní indikátor hladiny s indikačním plovákem

## Problematika mazání přírubových spojů

Provozní podmínky definované tlakem a teplotou chladiva primárního okruhu vyžadují použití správných mazadel pro přírubové spoje nátrubků víka reaktoru. Ohled se přitom musí brát i na použité materiály spojovacích materiálů a požadavky kladené na chemickou čistotu mazadel pro vyloučení rizika koroze dílů z austenitických ocelí v případě jejich kontaminace rizikovými chemickými látkami. Na jaderné elektrárně se tak nemohou používat běžná mazadla, která se používají v jiných aplikacích za vyšších teplot kolem 300 °C. Tím se okruh vhodných mazadel zužuje, nelze používat mazadla s obsahem síry a jejich sloučenin, mazadla bez řízeného obsahu halogenních prvků, nebo mazadla na bázi mědi. I když se na trhu přesto vyskytují zaručená mazadla s vysokou teplotní odolností, ne vždy je možné všem údajům věřit.

ŠKODA JS a.s. proto v případě nových mazadel nejprve provádí ověřovací zkoušky jejich chemického složení a následně si mazadla ověřuje i na maketách přírubových spojů, nebo zjednodušených závitových spojích. Problém většinou není při utahování spojů, pokud se dodrží všechny pokyny pro správnou aplikaci od výrobce mazadla, problém nastává obvykle až při demontáži spojů po teplotních cyklech. Z praktických zkoušek i z provozních dat máme ověřeno, že zmiňované svorníky M27 utažené na hodnotu momentu cca 200 Nm je při nevhodném použití mazadla potřeba povolit momentem i kolem hodnoty 600 Nm! Příčinou obvykle je, že vazké složky v mazadlu vlivem dlouhodobého působení vyšší teploty vyprchají a zbylé fragmenty mazadla spoj blokují, či dokonce slepí v závitových plochách. V této oblasti tak můžeme provozovatelům jaderných bloků poskytnout i důležité poradenské služby doplněné o možnost testování vzorků mazadel na našich stendech.



Obr. 5: Příklad výsledku zkoušek mazadel a způsobů mazání

## Závěr

Závěrem lze konstatovat, že systematický monitoring činností a průběhu prací během odstávek jaderných bloků je pro společnost ŠKODA JS a.s. důležitým faktorem pro zlepšování našich služeb pro provozovatele bloků a dává prostor pro návrh nových řešení, zařízení i přípravků. Mnohdy se přitom nejedná o nákladné výrobky v porovnání s technologiemi a zařízeními, pro která jsou navrženy, jejich přínos je však nesporný a pro činnosti prováděné během odstávek mnohdy znamenají přínos v podobě zkrácení časů na kritické cestě odstávky, zvýšení komfortu obsluhu při snížení kolektivních dávek pro obsluhující personál a v neposlední řadě i diametrálně vyšší úroveň kontroly kvality prováděných činností.

## VÝVOJ MODIFIKÁCIE NÁTRUBKU HRK NA VEKU REAKTORA 4. BLOKU V SE EBO

### DEVELOPMENT OF THE MODIFIED HRK NOZZLE ON THE REACTOR LID OF BLOCK 4 IN SE EBO

Igor Kostolný a Miroslav Jáňa

Výskumný ústav zvaračský z.z.p.o., Račianska 1523/71, 831 02 Bratislava, Slovenská republika

#### Abstrakt

V příspěvku bude uvedena výměna a oprava nátrubku pohonu HRK. Nátrubek pohonu HRK č. 1 21-34 4. bloku jaderného reaktoru EBO V2 (Slovensko) je vybrané zařízení tvořící hranici chladicího okruhu jaderného reaktoru a je zařazeno do bezpečnostní třídy BT1. Účelem vývoje byla modifikace v uzlu nátrubku na 4. bloku v SE-EBO. V roce 2008 byla identifikována indikace a v roce 2016 potvrzena indikace s rozvojem v místě rozhraní austenitického návaru vytvořeného elektrodou ZIO-8 a základním materiálem 22K předmětného nátrubku. Způsob realizace spočíval v odstranění původní vrchní přírubové části nátrubku a jejím nahrazením novým kusem technologií orbitálního TIG svařování v pulzním režimu s přidáváním studeného drátu a opracováním jednoúčelovým jednoklínovým vyvrtávacím zařízením na původní výrobní rozměrové, dispoziční a geometrické tolerance. Cílem navrhované změny bylo dosáhnout dlouhodobě udržitelné provozuschopnosti a spolehlivosti HRK během dalšího provozu jaderné elektrárny.

#### Abstract

The paper will describe the replacement and repair of the HRK drive spigot. HRK No. 1 21-34 drive nozzle of the 4th unit of the EBO V2 nuclear reactor (Slovakia) is a selected device forming the boundary of the cooling circuit of the nuclear reactor and is classified in safety class BT1. The purpose of the development was a modification in the spigot node on the 4th block in SE-EBO. An indication was identified in 2008 and an indication was confirmed in 2016 with the development at the interface of the austenitic weld created by the ZIO-8 electrode and the base material 22K of the socket of question. The method of implementation consisted in removing the original upper flange part of the socket and replacing it with a new piece using orbital TIG welding technology in pulse mode with the addition of cold wire and processing with a single-purpose single-wedge boring device to the original manufacturing dimensional, layout and geometric tolerances. The aim of the proposed change was to achieve long-term sustainable operability and reliability of the HRK during the further operation of the nuclear power plant.

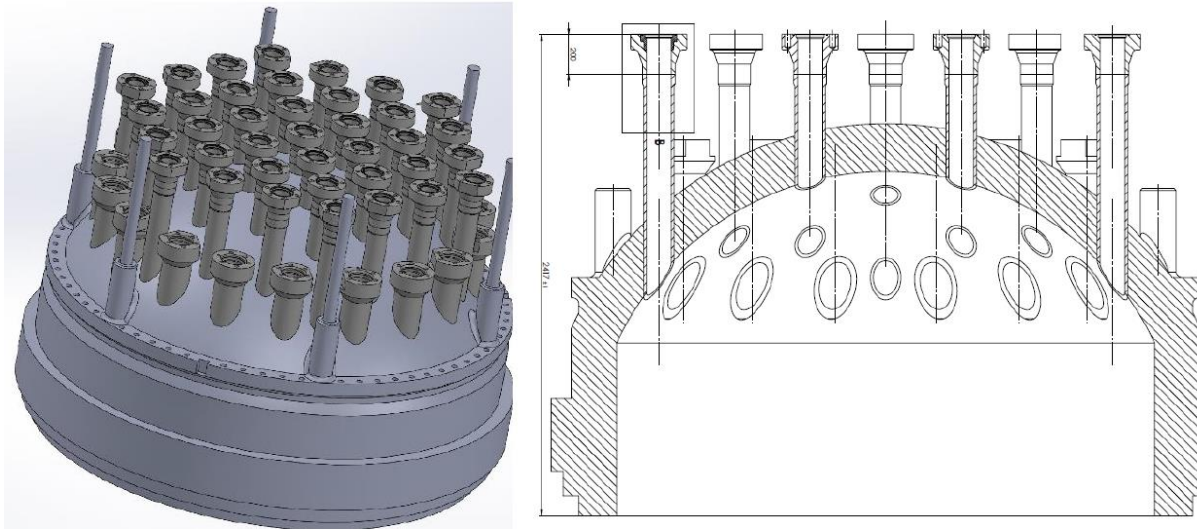
#### Úvod

Predmetom projektu zmeny „modifikácia v uzle nátrubku č. 21-34 pohonu HRK 4.bloku JE EBO V2“ je modifikácia poškodenej časti HRK výmenným spôsobom. Jedná sa o modifikáciu poškodenej vrhnej prírubovej časti nátrubku HRK č. 21-34 novou časťou. Cieľom navrhovanej zmeny je dosiahnuť dlhodobu udržateľnú prevádzkyschopnosť a spoľahlivosť HRK počas ďalšej prevádzky JE. Jadrový reaktor 4.bloku JE EBO V2 vrátane horného bloku a nátrubkov HRK bol vyrobený v ŠKODA JS a.s. Zariadenie uzla reaktora sa nachádza v objekte 800 – budova reaktorov. Budova reaktorov tvorí centrálnu časť HVB, v ktorej sú umiestnené hlavné technologické zariadenia primárneho okruhu.

Z konštrukcie tlakovej nádoby reaktora typ V-213, vyplýva, že vo vypuklom veku reaktora je osadených 37 ks rovnomerne rozmiestnených nátrubkov pohonov HRK (obr. 1), ktoré sú vyrobené z rovnakého materiálu ako veko reaktora - uhlíková oceľ 22K. Nátrubok HRK sa nachádza v prostredí chladiaceho média primárneho okruhu s koncentráciou kyseliny boritej



$H_3BO_3$  0 - 13,5 g/kg, pričom max povolená hodnota je 16 g/kg v závislosti od režimu bloku pri nominálnej prevádzke. Prevádzková teplota chladiva je 300 °C.



Obr. 1: Vypuklé veko reaktora s osadenými 37 ks nátrubkov pohonu HRK

Nátrubok pohonu HRK je do veka pripojený svojou valcovou časťou zvaraním a vrchná prírubová časť nátrubku je ukončená v rozšírenej časti prírubou. Do vnútra valcového otvoru sa po výške nátrubku vkladá tolerované austenitické tenkostenné puzdro. Vo vrchnej prírubovej časti je vo vnútri valcovej časti, na výške 80 mm od povrchu nátrubku, realizovaná vrstva austenitického návaru do základného uhlíkového materiálu 22K nátrubku. Na rozhraní základného materiálu a austenitického návaru bola identifikovaná celoobvodová radiálna indikácia (trhlina), ktorá prerástla lokálne až do základného materiálu 22K. Lokálna indikácia (trhlina) svojím rozvojom dosahuje hodnotu, kedy je nutné plánovaným a riadeným spôsobom indikáciu komplexne odstrániť, pre zabezpečenie spoľahlivosti zariadenia bez vplyvu na jadrovú bezpečnosť.

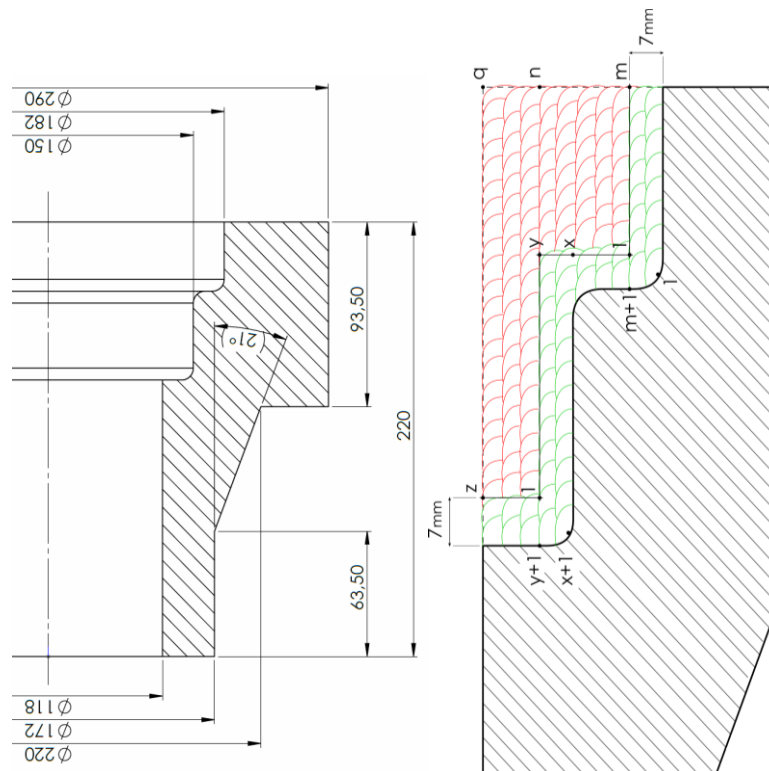
Na základe uvedeného došlo k trvalému odstráneniu celoobvodovej radiálnej indikácie (trhliny) na rozhraní ZM a austenitického návaru, zvaraniu novej prírubovej časti nátrubku, jeho opracovaniu a vkladaniu austenitického puzdra a tepelného tienia podľa platnej dokumentácie schválenej Úradom jadrového dozoru Slovenskej republiky.

#### **Výroba a atestácia náhradného dielu nátrubku č. 21-34**

Náhradný diel nátrubku určený na výmenu pôvodnej prírubovej časti bol vyrobený z výkovku materiálu 22K. Pred začiatkom prác bol hutný polotovár atestovaný (typ 3.2) a po hrubovaní bol na jeho vnútornom priemere vyhotovený austenitický návar.

Naváranie sa vykonávalo robotickým plne automatickým zvaraním technológiou TOP-TIG v pulznom režime.

Prvá vrstva návaru hrúbky 7 mm bola vytvorená prechodovým nehrdzavejúcim austenitickým prídavným materiálom typu 309LSi a samotný návar bol následne zhotovený z materiálu typu 316 LSi. Vyhotovenie nehrdzavejúceho návaru je schematicky znázornené na obr. 2. Na základe BNS II 3.3/2011 atesty použitých základných a prídavných materiálov musia byť doložené ako inšpekčné certifikáty typu 3.2 podľa STN EN 10 204.



Obr. 2: Austenitický návar nátrubku HRK

### Úkosovanie poškodeného nátrubku č. 21-34 pohonu HRK

Modifikácia v uzle nátrubku spočívala v odstránení poškodenej vrchnej časti nátrubku a následným privarením novej vrchnej prírubovej časti nátrubku technológiou orbitálneho TIG zvarovania v pulznom režime s pridávaním studeného drôtu. Na vyhotovenie zvarových spojov základných materiálov z ocele 22K sa použil prídavný materiál G3Si1 – EMK 6D. Vrchná prírubová časť nátrubku pohonu HRK sa odpichla pomocou úkosovacieho zariadenia obrábaním a pripravila sa zvarová hrana resp. zvarový úkos na perko zo spodnej prírubovej časti nátrubku. Na úkosovanie boli vyrobené špeciálne jednocelové nože na mieru presne pre túto operáciu. Špeciálne úkosovacie zariadenie je zobrazené na obr. 3.



Obr. 3: Osadené špeciálne úkosovacie zariadenie

### Zvárání a opracování nové přírubové části nátrubku

Na zvárání vrchnej přírubovej časti nátrubkov HRK sa použilo zariadenie od spoločnosti MAGNATECH. Veľmi dobré konštrukčné riešenie zvaracej hlavy umožňuje jej použitie v stiesnených priestoroch. Zvaraciu operáciu priamo na mieste dokumentuje obr. 4. Na vytvorenie celistvého zvarového spoja sa vytvorili jednotlivé programy na ovládacom zariadení zvaracej hlavy, ktoré predstavujú zvárání jednotlivých húseníc s ich daným označením.

Na zvárání bolo použitých 77 húseníc pri podmienke výslednej deformácie max. 0,05 mm. Táto tolerancia bola dodržaná používaním nízkych zvaracích príkonov s pridávaním studeného drôtu. Celkový čas zvarání nátrubku predstavoval 57 hodín. Všetky zvarové spoje boli podrobené nedeštruktívnemu testovaniu – VT, PT, RT, UT v 100 % rozsahu.

Po zvarání bol vnútorný priemer vrchnej prírubovej časti (prídavok) i samotný koreň zvaru opracovaný jednoúčelovým jednoklinovým obrábacím zariadením PBS – obr. 5. Vykonalo sa zameranie pozície novej vrchnej prírubovej časti nátrubkov na overenie dispozičných a rozmerových tolerancií.



Obr. 4: Zvaracie zariadenie so špeciálnou zvaracou hlavou

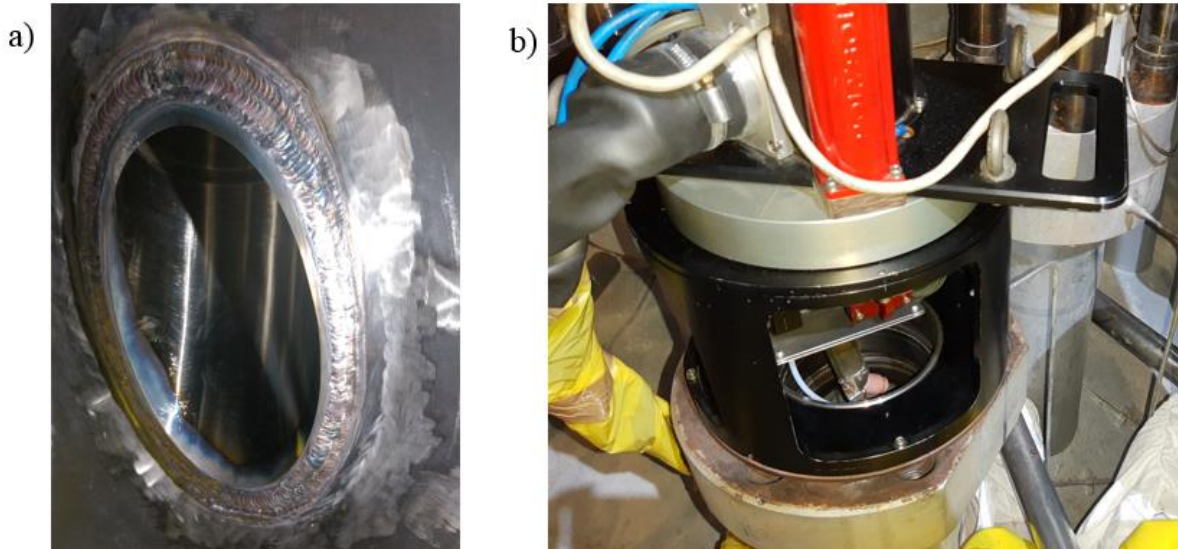


Obr. 5: Opracovanie privarenej prírubovej časti nátrubku zariadením PBS



### Zvárání austenitického a tieniaceho puzdra

Po vykonaní základných NDT kontrol bolo vložené tolerované austenitické puzdro, ktoré bolo privarené zospodu veka reaktora ručným zvaráním s prídavným materiálom OK Tigrod 316L (obr. 6a) a zhora automatizovaným TIG zvaráním (141) pomocou zariadenia od spoločnosti Polysud pomocou prídavného materiálu CARBO S-4430 Si.



Obr. 6: Privarenie austenitického puzdra a) z dolnej strany ručne; b) zhora orbitálna TIG zvaracia hlava

Po zavarení tolerovaného austenitického puzdra sa pristúpilo k nasunutiu tieniaceho puzdra na vrchnú časť modifikovaného nátrubku, ktoré sa privarilo ručným zvaráním s prídavným materiálom OK Tigrod 316L – obr. 7.



Obr. 7: Vkladanie a zvaranie tepelného tienenia

### Záver

Na ruských reaktoroch typu VVER 400, Výskumný ústav zvaračský ako prvý vykonal komplexnú opravu poškodeného nátrubku pohonu HRK a ako jediný v Európe. Modifikáciou došlo k predĺženiu životnosti a možnosti ďalšej prevádzky reaktora na 4. bloku v SE EBO. Všetky základné a prídavné materiály použité pri modifikácii nátrubku sú dokladované inšpekčnými certifikátmi typu 3.2 s atestáciami a samotné zvarové spoje sú dokladované schvaľovacími postupmi zvarovania WPQR.





## OPRAVY PROVEDENÉ VUZ BRATISLAVA NA JE TYPU VVER THE REPAIR DONE BY WRI BRATISLAVA ON NPP TYPE VVER

Marek Slováček <sup>a)</sup>, Igor Kostolný <sup>a)</sup> a Miroslav Jáňa <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumný Ústav Zvaračský Bratislava

<sup>b)</sup> Centrum pre vedu a výskum, s.r.o.

### Abstrakt

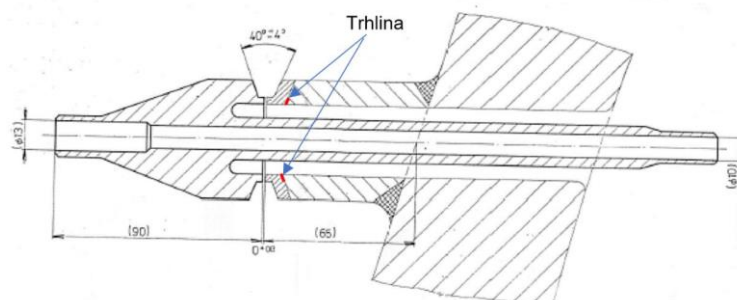
V překládaném článku a prezentaci bude proveden souhrn oprav vyvinutých a provedených společností VUZ Bratislava na JE typu VVER. Jde hlavně o následující opravy: heterogenní spoje superhavarijního napájení (HZS) parogenerátoru, rozváděcího kola hlavního cirkulačního čerpadla (RKHCC), oprava dělicí roviny tlakové nádoby reaktoru (TNR) a výměny a opravy nátrubku havarijního a regulačního komponentu (HRK). Bude uveden stručný přehled oprav, tzn. popis technologie opravy, včetně přípravných prací, tzn. svědečně vzorky, destruktivní a nedestruktivní zkoušky, provedené numerické simulace, dále popis speciálně vyvinutých zařízení, jak svařovacích, tak i obráběcích.

### Abstract

There is a summary of weld repair on NPP VVER type which has been developed and done by the Welding Research Institute of Bratislava. There are mainly the following repairs heterogenous weld joints emergency inlet of steam generator, replacement of the most exposed parts of distribution wheels in main circulation pump, repair of the main plane sealing grooves of the reactor VVER 440, manufacturing of pressure vessel safety rods socket inlet and also replacement technology. There is brief summary of repair, a description of technology including testing parts and mechanical testing, and also the description of developed special equipment.

### Výzkum a vývoj opravy heterogenního svarového spoje nátrubku N23 na PG v EMO 1 [1]

Nátrubek N23, obr. 1, je určený pro měření hermetičnosti (tlaku dusíku) košilek PG. Heterogenní svarový spoj nátrubku N23 je objemově možný zkoušet pouze ultrazvukem, protože nátrubkem prochází souosá roura. Ve všech 6-ti zkoušených svarech nátrubku N23 na EMO1 byly zjištěny indikace podobného charakteru. Na základě posouzení vad bylo rozhodnuto ke komplexní opravě.

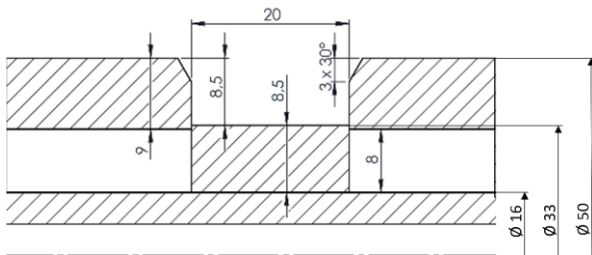


Obr. 1: Nátrubek N23

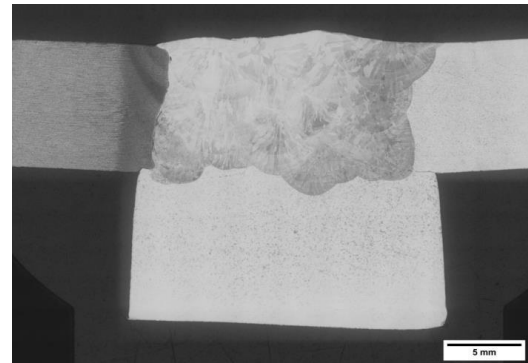
Degradačním mechanismem heterogenních svarových spojů na parogenerátorech je koroze na hranici ztavení svarového spoje a základního uhlíkového materiálu. Trhliny jsou inicializované z vnitřního povrchu a šíří se převážně po hranici svaru a poté rovnoběžně se svarem. Vzhledem na způsob korozní šíření mohli uvedené trhliny prorůst přes celou tloušťku stěny a způsobit netěsnost na sekundární straně parogenerátoru.

Uvedený svarový spoj je tvoření kombinací feritické oceli 12022.1 a korozivzdorné oceli MT316L. V důsledku výskytu indikací na hranici svarového spoje a feritického základního materiálu muselo dojít k odstranění poškozeného spoje i s TOO. Tím ale vznikla v oblasti kořene spoje mezera mezi základními materiály o délce 20 mm, tzn., byla nutnost vložit prsteneček do místa svařování z korozivzdorné oceli AISI 309, viz obr. 2.

Oprava svařováním byla provedena technologií TIG (141) s austenitickým přídatným materiálem OK Tigrod 309LSi, Ø 2,4 mm. Na základě provedených všech zkoušek dle požadovaných norem a předpisů byla oprava schválena a byl vydán inspekční certifikát. Na opravě nebyly identifikovány žádné vady, viz obr. 3.



Obr. 2: Schéma opravy



Obr. 3: Makrostruktura opravy

Výsledky měření tvrdosti HV v jednotlivých oblastech svarového spoje splnilo požadavku normy EN ISO 15614-1, tj. maximálně 380 HV. Zkoušky mezikystalové koroze dle předpisu EN ISO 3651-2 potvrdily, že nově vytvořený svarový spoj je odolný, bez vyloučených karbidů na hranicích zrn. Zkoušky tahem, vrubové houževnatosti a lámavosti potvrdily, že při svařování tepelným příkonem v rozmezí 0,5-0,8 kJ/mm, svarový spoj vykazuje výrazně vyšší hodnoty meze kluzu, pevnosti a vrubové houževnatosti, než jsou požadované v EN normách.

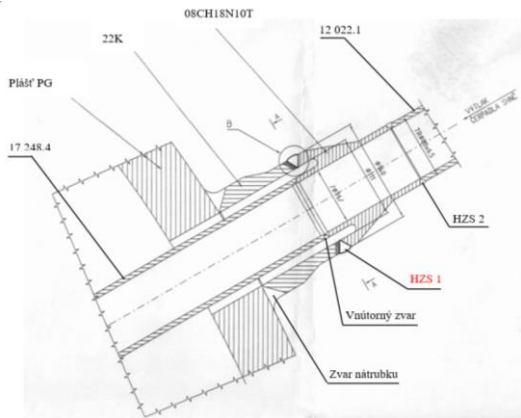
### Oprava HZS super havarijního napájení parogenerátoru [2, 3, 4]

Cílem projektu, resp. řešení je vývoj technologie a dodávka zařízení na opravu heterogenních svarových spojů SHN PG, viz obr. 4, pomocí automatizovaného způsobu obrábění a svařování. V rámci návrhu a ověření opravy, kde byl velmi malý manipulační prostor, obavy z vyosení potrubí při velmi komplikovaném oddělení poškozeného nátrubku, nutnost dodržet velmi striktní požadavky na svařovací hrany a nutnost zohlednit velmi komplikované fyzikálně metalurgických poměru HZS bylo vyvinuto nové speciální obráběcí zařízení a orbitální svařovací hlava.

Návrh technologie opravy HZS na systému SHN PG je založena na následujících dvou operacích:

- postupný proces vytváření úkosu ve směru kolmém na obráběný materiál plně automatizovaným procesem třískového obrábění bez použití chladicí kapaliny,
- proces orbitálního svařování metodou TIG (141) s použitím studeného drátu.

Pro přípravu svarových hran oprav na potrubí, resp. válcových průměrech, bylo v rámci uvedené opravy vyvinuto speciální zařízení, dálkově ovládaná přenosná frézovací hlava ATF-150, obr. 5, která umožňuje odebrat přesně definované množství výseku obvodového svarového spoje. Hlava je zkonstruovaná pro použití v místech s mimořádně omezeným manipulačním prostorem. Speciálně vyvinutý programovací systém umožňuje vytvoření trajektorii nástroje systémem point-to-point, včetně adaptivity, která zohledňuje geometrické nepřesnosti.



Obr. 4: Nátrubek SHN



Obr. 5: Přenosná frézovací hlava ATF-150

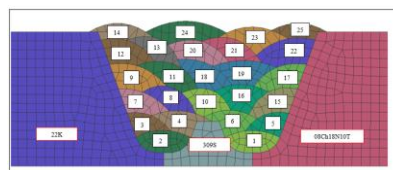
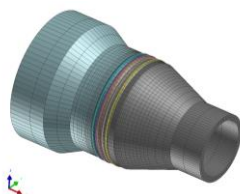
Oprava na systému SHN PG je provedena v následujících krocích, viz obr. 6:

- vyfrézování původního svarového spoje v celé tloušťce potrubí v rozsahu 0-180°,
- vyvaření 1/3 tloušťky potrubí s použitím prstence v rozsahu 0-180°,
- vyfrézování původního svarového spoje v celé tloušťce potrubí v rozsahu 180-360°,
- vyvaření 1/3 tloušťky potrubí s použitím prstence v rozsahu 180-360°,
- vyvaření přechodové vrstvy v horních 2/3 tloušťky svaru v rozsahu 0-360°,
- vyvaření zbývající výplně svaru v rozsahu 0-360°.

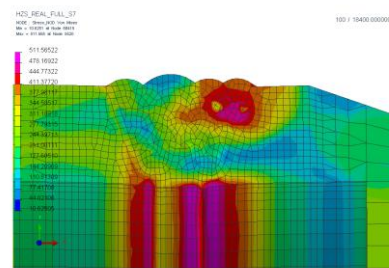


Obr. 6: Postup opravy

V rámci optimalizace technologie svařování byla provedena i numerická simulace procesu. Na obr. 7 je uveden výpočtový model a na obr. 8 je uvedeno výsledné zbytkové napětí.

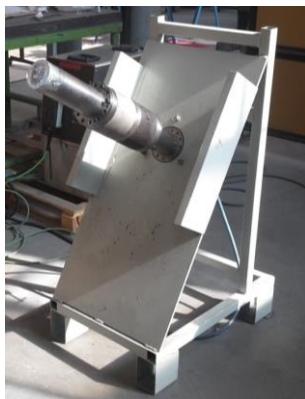


Obr. 7: Výpočtový model konečných prvků



Obr. 8: Zbytkové napětí po opravě

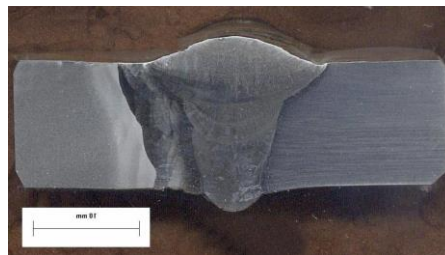
V rámci přípravy technologie opravy byl připraven na pracovišti VUZ Bratislava testovací mock-up, viz obr. 8. Na obr. 8 a obr 9 je uvedeno porovnání testovacího mock-up a reálného vyhotovení HZS SHNPG 22 v EMO. Na obr. 10 je uvedena makrostruktura ověřovacího svarového spoje. V tabulce 1 je uvedeno měření tvrdosti. Mikrostruktura rozboru spojů potvrdila feritickou strukturu v oceli 12022.1 v blízkosti hranic stavení.



Obr. 8: Mock up



Obr. 9: HZS SHNPG 22 v EMO



Obr. 10: Makrostruktura spoje

Tab. 1: Měření tvrdosti

Spoj R02	Oblast		Tvrdost (HV0,05)	
			Naměřené hodnoty	Průměr
Svarový kov Sv07CH25N13	Při HS	Dále od HS	204, (273), 211, 243	232
			(185), 133, 126, 123	127
	Ferit při HS	Při HS	253, 263, 308, 296	280
			153, 145, 149	149
ZM	TOO střed			
	Ferit při HS		123, 126, 137	129

Celá oblast svaru a TOO byla kompletně kontrolována pomocí NDT kontrol, jak RT, tak i UT. Rovněž byly vytvořeny kritéria přípustnosti chyb v opravných svarech. Dále byly vyhodnoceny i korozní vlastnosti svarových spojů.

Na základě všech obdržených výsledků je možné konstatovat, že vyvinutá oprava může být použita v praxi.

### Literatura

- [1] JÁŇA, Miroslav, KOSTOLNÝ, Igor a KOŠINOVÁ, Alena. *Výskum a vývoj opravy heterogénneho zvarového spoja nátrubku N23 na PG v EMOI*. článek.
- [2] JÁŇA, Miroslav, BLAŽÍČEK, Peter, ŠOŠKA, Anton, BALÁŽ, Milan a MRÁZ, Luboš. *Vývoj technológie opravného automatového zvarovania – optimalizácia postupu na HZS D140/90 na mock-up modeli*. Bratislava, VUZ Bratislava, 2016, výzkumná/technická zpráva, 264/2015/103.
- [3] JÁŇA, Miroslav, BLAŽÍČEK, Peter, ŠOŠKA, Anton, BALÁŽ, Milan a MRÁZ, Luboš. *Vývoj technológie opravného automatizovaného zvarovania – analýza súčasného stavu*. Bratislava, VUZ Bratislava, 2015, výzkumná/technická zpráva, 264/2015/103.
- [4] JÁŇA, Miroslav, BLAŽÍČEK, Peter, ŠOŠKA, Anton, BALÁŽ, Milan a MRÁZ, Luboš. *Vývoj, výroba a overenie funkčnosti zariadenia pre automatové opravné zvarovanie metódou TIG*. Bratislava, VUZ Bratislava, 2016, výzkumná/technická zpráva, 264/2015/103.



## **NETESNOSTI NA RÚRKE Z IL PRE MERANIE SYSTÉMU KONTROLY TESNOSTI OCHRANNÝCH PLÁŠŤOV PRIMÁRNYCH KOLEKTOROV PG JE BOHUNICE**

### **LEAKAGES ON THE IMPULSE LINE TUBE FOR MEASUREMENT OF THE PROTECTIVE COVER TIGHTNESS CONTROL SYSTEM OF THE STEAMGENERATOR PRIMARY COLLECTOR NPP BOHUNICE**

Miloš Baľák a Jana Petzová

VUJE, a.s., Divízia diagnostiky jadrovo-energetických zariadení, Oddelenie štruktúrnych analýz

#### **Abstrakt**

Počas pravidelnej generálnej odstávky jadrovej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach boli identifikované netesnosti na rúrke z impulznej línie pre meranie systému kontroly tesnosti ochranných plášťov (SKTOP) primárnych kolektorov parogenerátorov (PG).

Pomocou nedeštruktívnych metodík boli na rúrke vyznačené lokality, kde bolo detekovaných päť netesností.

Príčina a mechanizmus poškodenia tejto austenitickej rúrky s rozmermi  $\phi 22 \times 2,5$  mm boli stanovené metalografickou analýzou, koróznymi, mechanickými a chemickými skúškami, ako aj analýzou povrchov. Analyzovaná rúrka pochádzala z priestoru mimo vnútornej zostavy PG.

#### **Abstract**

Leaks were identified on the impulse line tube for measuring the protective cover tightness control system (MPCTCS) of the primary collectors of the steam generators (SG) during the regular general shutdown of the nuclear power plant in Jaslovské Bohunice.

Locations on the tube were marked using non-destructive methods, where five leaks were detected.

The cause and mechanism of the failure of this  $\phi 22 \times 2.5$  mm austenitic tube were determined by metallographic analysis, corrosion, mechanical and chemical tests, as well as surface analysis. The analyzed tube came from a place outside the internal construction of the SG.

#### **Úvod**

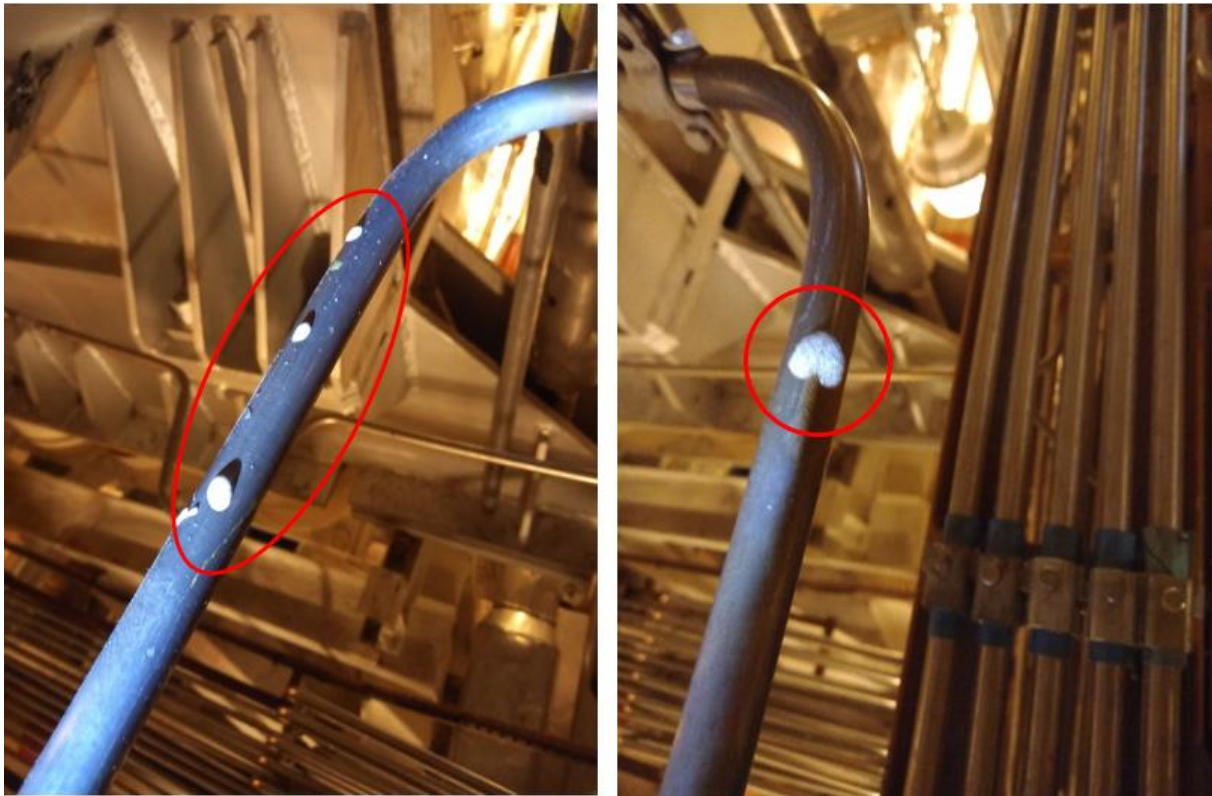
Parogenerátory typu PVG-230 sú valcové horizontálne tlakové nádoby, ktoré zabezpečujú produkciu pary v primárnom okruhu (PO) JE. Rúrka z impulznej línie (IL) pre meranie systému kontroly tesnosti ochranných plášťov (SKTOP) primárnych kolektorov parogenerátorov sa používa na privádzanie pracovného inertného plynu do drážky medzi primárnym kolektorom PG a primárnym vekom. Jej časť je vedená vnútram PG a časť mimo vnútornej zostavy PG. Prípadný pokles tlaku plynu, resp. zníženie konštantného pracovného pretlaku 0,6 MPa indikuje netesnosť primárneho okruhu v oblasti parogenerátora.

Počas prevádzky 4. bloku JE Jaslovské Bohunice v roku 2022 bol zaznamenaný pokles tlaku inertného plynu v rámci systému kontroly tesnosti ochranných plášťov PG. Vykonaním NDT kontroly na rúrke IL pre meranie SKTOP parogenerátorov bolo identifikovaných v troch rôznych lokalitách celkovo päť netesností (obr. 1). Zistené netesnosti boli mimo vnútornej zostavy PG a rúrka bola následne vyrezaná a nahradená novou.

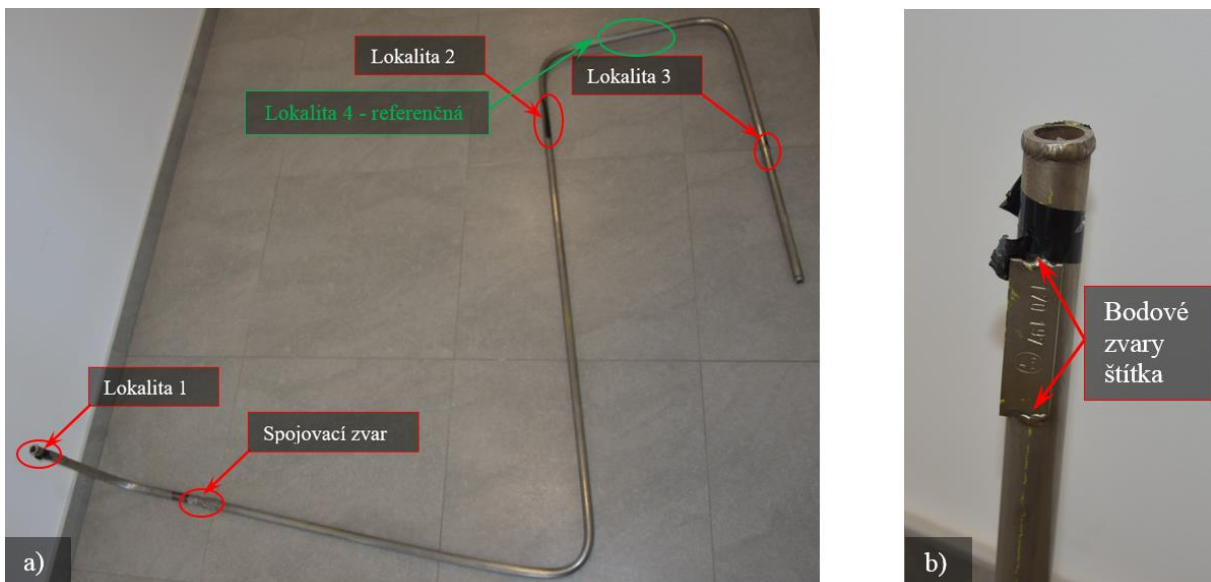
V júli 2022 bola doručená do VUJE, a.s. celá vyrezaná rúrka s dĺžkou 465 cm a rozmermi  $\phi 22 \times 2,5$  mm (obr. 2). Požiadavkou prevádzkovateľa JE Bohunice SE, a.s. bolo stanovenie príčiny a mechanizmu poškodenia dodanej rúrky.



Deklarované materiálové aj pracovné parametre trasy SKTOP do PG sú nasledovné: oceľ 1.4541, rozmer  $\phi 22 \times 2,5$  mm, médium dusík, pracovný pretlak 0,6 MPa, pracovná teplota 30 °C, bez izolácie.



Obr. 1: Stanovenie miest indikácií NDT skúškou priamo v prevádzke JE Bohunice



Obr. 2: Dodaná rúrka z IL pre meranie SKTOP: a) vyznačené lokality netesností, b) detail „lokality 1“

### Zhodnotenie stavu a postup prác

Z fotografií na obr. 1 a obr. 2 je zrejmé, že indikácie boli zistené na priamej a zároveň vodorovnej časti rúrky z IL pričom sú orientované vždy v jej hornej časti. Zaujímavosťou je, že netesnosť bola zistená NDT skúškou aj v mieste bodového zvaru značiaceho štítku (obr. 2b).

Vonkajší povrch dodanej rúrky bol vo všeobecnosti kovovo lesklý, bez plošnej korózie, viditeľných nečistôt, kvapalín a tukov. Neboli viditeľné žiadne trhliny a jamky ani vo vyznačených lokalitách.

Vnútorý povrch IL bolo možné vizuálne skontrolovať vzhľadom na malé rozmery rúrky len prvých pár centimetrov na začiatku a konci rúrky, kde bol pozorovaný v oblasti zvarov (hlavne „lokality 1“) výskyt plošnej korózie (obr. 3).

Navrhnutý rozsah a postup prác bol nasledovný:

- príjem vzorky, zhodnotenie stavu a určenie postupu prác,
- dokumentácia vzoriek v dodanom stave, vizuálna prehliadka, lokalizácia netesností,
- návrh rezacieho plánu a príprava na analýzy,
- analýza chemického zloženia,
- metalografická analýza materiálu v miestach bez porušenia a v mieste netesností,
- EDX analýza častíc na povrchoch a lomových plochách,
- vyhodnotenie výsledkov, stanovenie príčin a mechanizmu poškodenia.



Obr. 3: Detail na vnútorný povrch obvodového zvaru a základného materiálu napadnutý plošnou koróziou (lokality 1)

### Rezací plán a rezanie vzoriek

Postup rezania bol navrhnutý ako dvojkrokový. Prvé „hrubé“ rezanie bolo vykonané za účelom získania troch vyznačených lokalít s netesnosťami (obr. 4; ozn. červeným „lokality 1 až 3“ na obr. 2) a jednej referenčnej lokality (ozn. zeleným „lokality 4“ na obr. 2); všetky štyri s dĺžkou 120 až 150 mm. Referenčná lokalita bola zvolená ako miesto bez indikácií preverené NDT skúškou slúžiaca na porovnanie výsledkov s lokalitami s netesnosťami. Následne bolo realizované detailné rezanie hlavne na metalografické analýzy - pozdĺžne aj priečne rezy. V blízkosti „lokality 1“ bola vyrezaná vzorka na elektrochemickú potenciokinetickú reaktivačnú skúšku (EPR).



Na detailné precízne rezanie bola použitá elektroiskrová rezačka EIR-EMO1 s využitím mosadzného rezacieho drôtu  $\phi$  0,25 mm.



Obr. 4: Vyrezané vzorky s netesnosťami na analýzu po „hrubom“ rezaní

### Analýza chemického zloženia

Analýza chemického zloženia dodanej rúrky z IL pre meranie systému kontroly tesnosti ochranných plášťov primárnych kolektorov PG41 bola realizovaná ručným XRF analyzátorom VANTA.

Dodaná rúrka z IL je zvarená z dvoch častí (obr. 2a). Miesto merania obidvoch častí bolo prebrúsené brúsnym papierom ZrO o zrnitosti 180. Analýza bola realizovaná na vonkajšom povrchu rúrky. Výsledky z merania, ktoré sú uvedené v tabuľke 1, deklarujú správne použitie akosti Cr-Ni austenitickej nehrdzavejúcej ocele 1.4541.

Tab. 1: Namerané hodnoty chemického zloženia rúrky ručným XRF analyzátorom VANTA

Predpis [hm.%]	Označenie vzorky	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti
		max. 0,08	max. 2,00	max. 1,00	max. 0,040	max. 0,015	9,00 ÷ 12,00	17,00 ÷ 19,00	5×C ÷ 0,70
Namerané hodnoty [hm.%]	Kratšia časť rúrky (loka- lita 1)	-*	1,270 ± 0,060	0,546 ± 0,051	-**	-**	10,972 ± 0,105	17,802 ± 0,096	0,446 ± 0,033
	Dlhšia časť rúrky (loka- lita 2-4)	-*	1,229 ± 0,060	0,482 ± 0,048	-**	-**	10,891 ± 0,102	17,562 ± 0,093	0,621 ± 0,036

Pozn.: \* nemerateľné, \*\* pod rozlišovacou schopnosťou

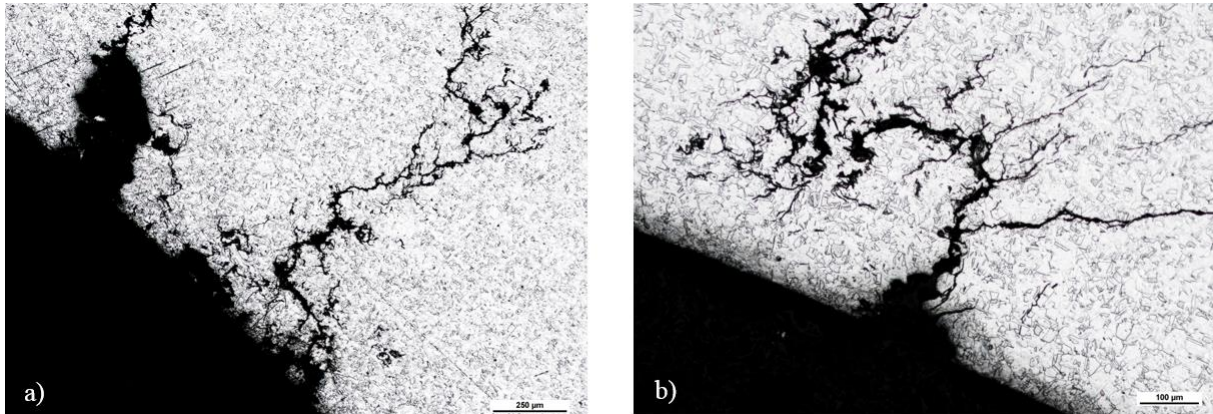
### Metalografická analýza

Príprava metalografických vzoriek spočívala v zalisovaní vyrezaných vzoriek do lisovacej MTG hmoty a v postupnom viackrokovom brúsení na brúsných papieroch SiC, ako aj v leštení diamantovou suspenziou s veľkosťou častíc 1 a 3  $\mu$ m. Vzorky boli leptané elektrolyticky v roz-  
toku kyseliny šťavelovej.

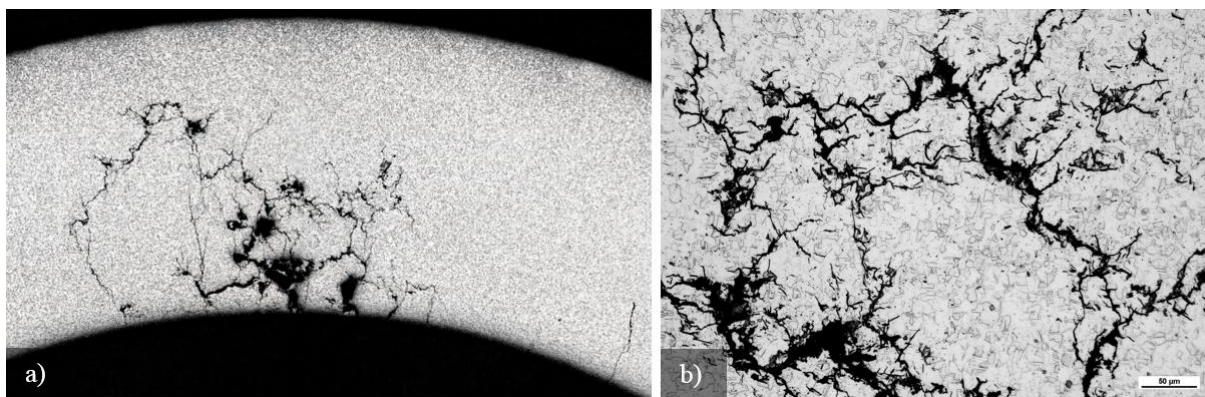
Mikroštruktúra ocele hodnotenej rúrky z IL je vo všetkých analyzovaných lokalitách veľmi jemnozrná, homogénna, tvorená polyedrickými austenitickými zrnami s malým množstvom nekovových vtrúsenín. Stav mikroštruktúry odpovedá Cr-Ni austenitickej oceli 1.4541 po valcovaní a rozpúšťacom žíhaní. Stredná veľkosť zrna sa pohybovala v pozdĺžnom reze  $5,7 \pm 1,3$  mm a priečnom reze  $7,3 \pm 4,0$  mm.

V jednotlivých hodnotených lokalitách bolo vykonaných viacero metalografických rezov v pozdĺžnom aj priečnom smere na os rúrky. Vo všetkých prípadoch trhliny iniciovali na korózných jamkách a šírili sa z vnútorného povrchu (obr. 5). Rozvetvené aj nerozvetvené korózne trhliny sa šírili prednostne v smere kolmom na maximálne ťahové napätia (obr. 6). Pozorované trhliny mali prevažne interkryštalický charakter (obr. 6b). Ich hĺbka dosahovala hodnoty od pár

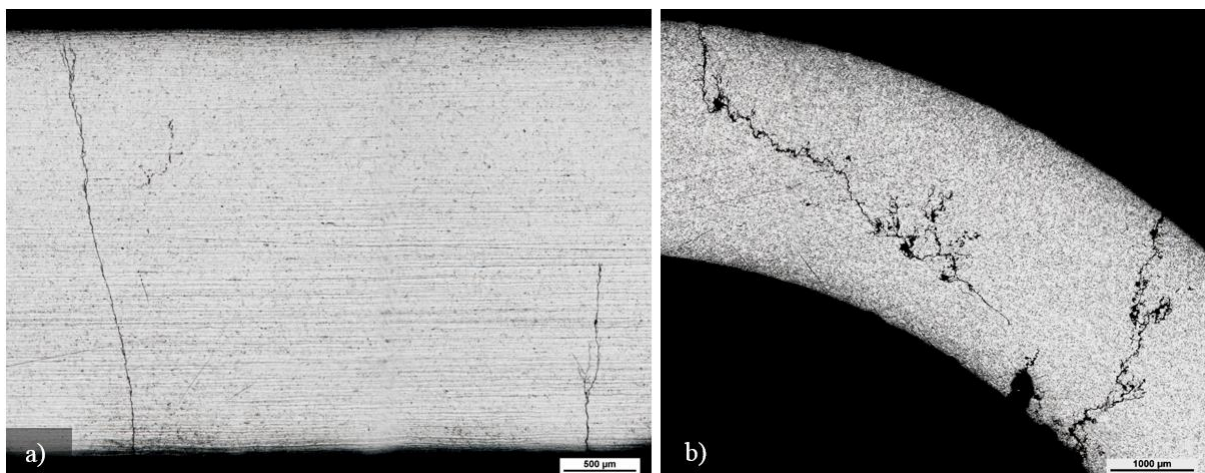
mikrometrov až po stovky mikrometrov. V niektorých miestach prechádzali cez celú hrúbku steny rúrky (obr. 7).



Obr. 5: Detail trhliny na vnútornom povrchu vzorky v lokalite 2 – priečny rez (rôzne miesta)



Obr. 6: Rozvetvené interkryštalické trhliny šíriace sa z vnútorného povrchu – lokalita 1



Obr. 7: Trhliny šíriace sa cez celú hrúbku steny rúrky – lokalita 2

Zaujímavosťou bolo zistenie, že mikrotrhliny sa vyskytovali aj v referenčnej „lokalite 4“, kde sa šírili z vnútorného povrchu až do hĺbky 20 µm. Zároveň boli stereomikroskopom pozorované v rovnakej lokalite obvodové trhliny, ako vidno na obr. 8.



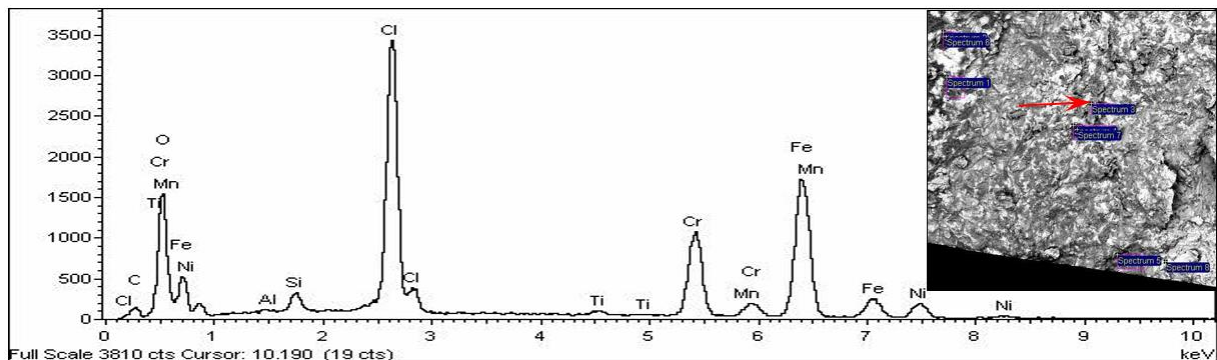


Obr. 8: Výskyt trhlin v referenčné „lokality 4“

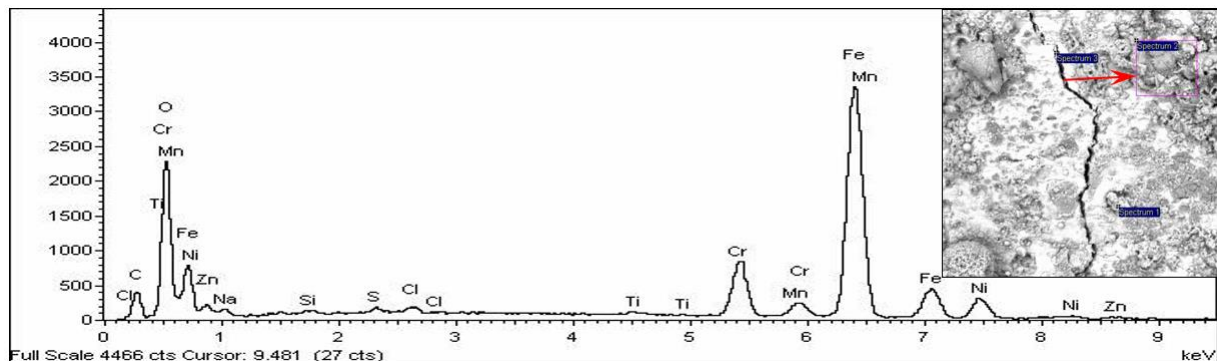
### EDX analýza častíc na povrchoch a lomových plochách

Bodová a plošná EDX mikroanalýza častíc bola realizovaná hlavne na vnútorných povrchoch hodnotenej rúrky z IL a lomových plochách vzniknutých dolomením existujúcich trhlin v mieste netesností. Na analýzu bol použitý rastrovací elektrónový mikroskop (REM) TESCAN VEGA TS 5130 vybavený EDX analyzátorom INCA.

Detailnou analýzou magistrálnej lomovej plochy v „lokality 2“ bola zistená oxidická vrstva s prítomnosťou nežiadúceho Cl, ktorej chemická podstata bola preukázaná plošnou aj bodovou EDX analýzou (obr. 9). Častice chlóru sa vyskytovali aj vnútorných povrchoch rúrky.



Obr. 9: Oxidická vrstva s prítomnosťou Cl na lomovej ploche „lokality 2“



Obr. 10: Oxidická vrstva s prítomnosťou Cl na vnútornom povrchu „lokality 2“



**Záver**

- Príčinou netesností rúrky z IL pre meranie SKTOP primárnych kolektorov PG JE EBO V2 je korózne praskanie pod napätím v dôsledku prítomnosti chloridov na jej vnútornom povrchu.
- Pozorované rozvetvené aj nerozvetvené transkryštalické a hlavne interkryštalické trhliny iniciovali na korózných jamkách vždy na vnútornom povrchu rúrky a šírili sa prednostne v smere kolmom na maximálne ťahové napätia.
- Prítomnosť častíc chlóru bola preukázaná vo všetkých hodnotených lokalitách na vnútorných povrchoch rúrky ako aj na povrchu a v hĺbke každej pozorovanej trhliny.
- Fraktografická analýza lomovej plochy preukázala dlhodobý postupný rast trhlín.
- Metalografické analýzy potvrdili a preukázali prítomnosť netesností vyznačených NDT pracovníkmi SE, a.s.

**Pod'akovanie**

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum fyzikálnych, technických a materiálových aspektov vysokoteplotných reaktorov s potenciálom výroby vodíka, číslo projektu: 313011BUH7, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

**Literatúra**

- [1] BALÁK, Miloš a kol. *Analýza a expertné posúdenie príčin vzniku a rozvoja netesností na vzorke rúrky z IL pre meranie SKTOP primárnych kolektorov PG41 JE EBO V2*. Trnava, september 2022, výskumná správa, 0360/27/2022.



## HODNOTENIE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ KOMPENZÁTORA OBJEMU JE BOHUNICE V1

## EVALUATION OF THE MATERIAL PROPERTIES OF THE VOLUME COMPENSATOR JE BOHUNICE V1

Juraj Ďurica a Jana Petzová

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

### Abstrakt

Predkladaný príspevok popisuje projekt, ktorý sa zameriava na hodnotenie materiálových vlastností plášťa a nátrubku vstreku kompenzátora objemu (KO), po dlhodobej reálnej prevádzke 28 rokov. Likvidácia zariadení primárneho okruhu vyradovanej JE V1 v Jaslovských Bohuniciach predstavuje unikátnu možnosť pre získanie relevantných informácií o vplyve dlhodobej prevádzky na degradáciu materiálových vlastností konštrukčných ocelí jednotlivých komponentov. Predmet projektu zahŕňa problematiku využitia a analýz materiálov z kompenzátora objemu JE V1.

Kompenzátor objemu má zo všetkých bezpečnostne významných komponentov (BVK) primárneho okruhu (PO) najvyššiu prevádzkovú teplotu –  $T_{prev.} = 325 \text{ °C}$  a je vyrobený z perlitickej ocele 22K, ktorá je citlivejšia na teplotné starnutie ako austenitická oceľ.

V Projekte budú hodnotené práve vzorky materiálov KO z oblasti kolísania hladiny, zvarov a vzorky nátrubku vstreku, pri ktorých je najväčší predpoklad ovplyvnenia materiálových vlastností spôsobených tepelným starnutím.

### Abstract

The presented contribution outlines a project focused on the evaluation of the material properties of the pressurizer vessel after a long-term operation of 28 years. The decommissioning of equipment from the primary circuit of the retired V1 Nuclear Power Plant in Jaslovské Bohunice presents a unique opportunity to acquire relevant information about the effects of extended operation on the degradation of material properties of structural steels in individual components. The project's scope encompasses the utilization and analysis of materials from the V1 VCT.

Among the safety-critical components of the primary circuit, the VCT stands out with the highest operating temperature,  $T_w = 325 \text{ °C}$ , and is constructed from perlitic steel 22K, which is more sensitive to thermal aging compared to austenitic steel.

In this project, the focus will be on evaluating samples of VCT materials taken from areas including level fluctuation, welds, and injection nozzle stubs. These areas hold the highest potential for material property alteration due to thermal aging effects.

### Úvod

Systém kompenzácie objemu s poistnými ventilmi a elektrickými ohrievačmi je určený na vytvorenie tlaku 12,26 MPa nad aktívnou zónou v stacionárnych režimoch a na obmedzenie tlakových zmien v primárnom okruhu (PO) pri prechodových režimoch, keď sa mení stredná teplota chladiva, a tým aj jeho objem. Základným zariadením tohto systému je parný kompenzátor objemu, ktorý je pripojený na neoddeliteľnej časti hlavnej cirkulačnej slučky (HCS) č. 6 na 1. bloku a na neoddeliteľnej časti HCS č. 1 na 2. bloku JE Bohunice, pomocou dvoch potrubí z austenitickej ocele s priemerom 245 mm a hrúbkou steny 18 mm. Pracovný tlak sa udržiava stláčaním, alebo rozpínaním parnej fázy v hornej časti kompenzátora.

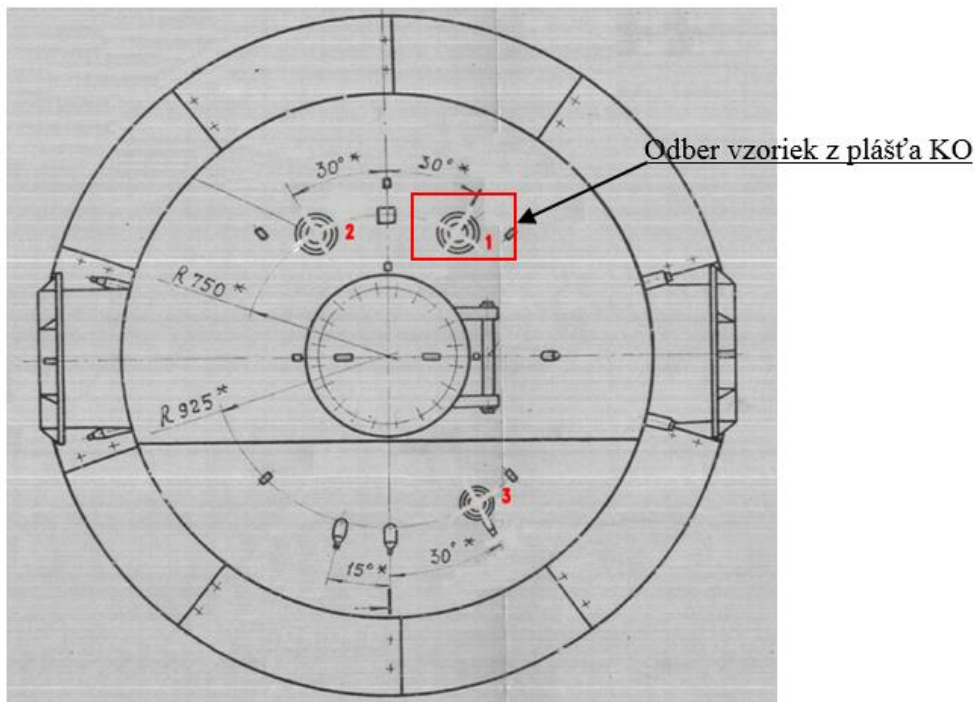
Elektrické ohrievače sa používajú na vytvorenie požadovaného tlaku chladiva v KO. Skupiny ohrievačov sa zapínajú automaticky alebo ručne operátorom reaktora. Na dne KO sa nachádza oporný valec pre elektrické ohrievače, ktorý zároveň zabezpečuje lepšie prúdenie chladiva okolo elektrických ohrievačov.

Kompenzátor objemu je vertikálna tlaková nádoba, ktorá je zvarená zo štyroch prstencov (tri prstence s hrúbkou 153 mm a spodný s hrúbkou 204 mm), z vrchného veka a spodného dna (hrúbka steny 160 mm). Vnútro nádoby má výstelku z nehrdzavejúcej ocele s hrúbkou 9 mm. V oblasti dna KO sú dva nátrubky DN200 a na hornom veke je otvor DN450 používaný na revízne obhliadky vnútorného povrchu KO. Okolo revízneho otvoru sú dva nátrubky DN100. Jeden sa používa na vstrek do KO a druhý na odvod pary z KO cez impulzné poistné ventily do BN. V spodnom prstenci hrubom 204 mm sú zabudované elektrické ohrievače.

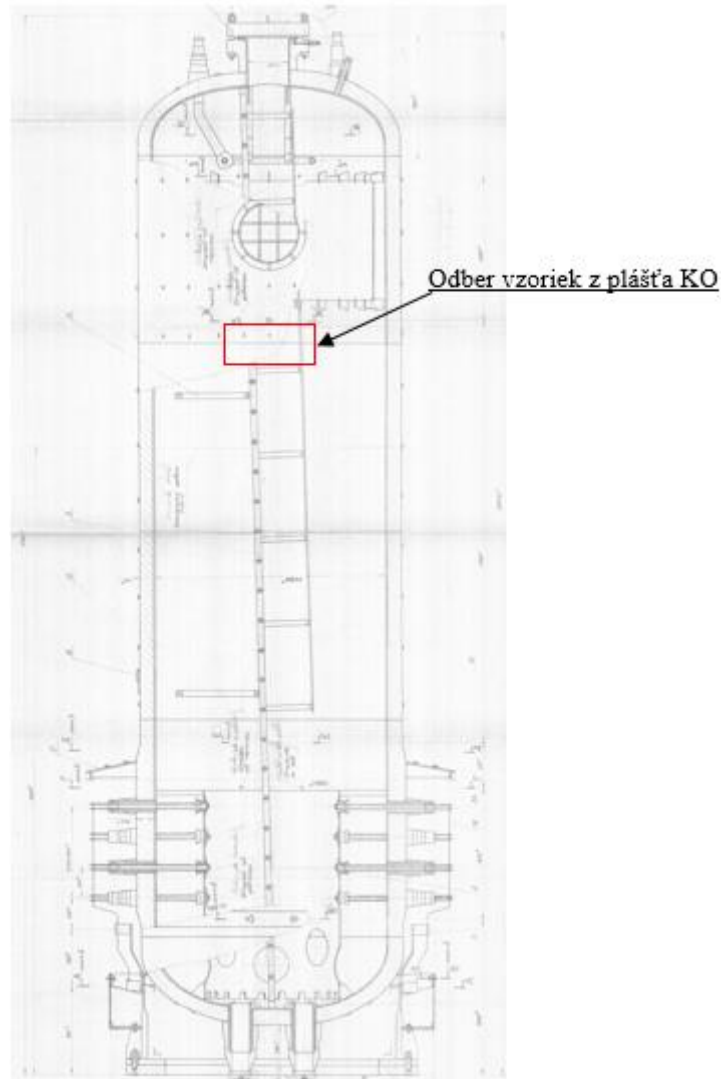
Vo vrchnej časti KO sa nachádza kolektor, ktorý zabezpečuje dobré rozptýlenie chladnej vody do parného priestranstva KO. Vstrek chladnej vody zabezpečuje kondenzáciu pary a tým dochádza k zníženiu tlaku pri vtekaní chladiva do KO. Tepelné tienenie prichytené v hornej časti KO, má funkciu tepelnej ochrany steny KO pri vstreku chladnej vody. Veko je utesnené dvoma tesneniami. Z medzipriestoru tesnení je vývod cez nátrubok, ktorý zabezpečuje kontrolu tesnosti veka.

Základnými parametrami kompenzátora objemu JE V1 sú:

- výška: 10835 mm,
- vonkajší/vnútorný priemer: 2675–2770 mm / 2400 mm,
- vnútorný objem: 38 m<sup>3</sup>,
- objem vody: 24 m<sup>3</sup>,
- objem pary: 16 m<sup>3</sup>,
- pracovná teplota: 325 °C,
- pracovný tlak: 12,25 MPa,
- hmotnosť: 116,3 t,
- výkon elektroohrievačov: 1,6 MW.



Obr. 1: Veko KO 1. bloku JE V1, 1) nátrubok vstrelu s vyznačením miesta odberu, 2) nátrubok potrubia havarijného vypúšťania, 3) nátrubok potrubia odvodu pary



Obr. 2: Kompenzátor objemu 1. bloku JE V1 s vyznačením miesta odberu vzoriek v oblasti ZK a ZM

### **Získanie, fragmentovanie a dekontaminácia vzoriek**

Pred samotným odberom jednotlivých vzoriek z kompenzátora objemu 1. bloku JE V1, ktorý bol v prevádzke 28 rokov, bol vypracovaný program prác pre fragmentáciu a dekontamináciu veľkorozmerných vzoriek, ktorý podliehal schváleniu organizácií JAVYS, a. s. a ÚJD SR, a. s.

Pred fragmentáciou KO boli realizované prípravné práce spočívajúce v dekontaminácii vnútorných povrchov KO pomocou chemicko-mechanickej dekontaminačnej metódy, ktorá zabezpečila dekontamináciu povrchov na stanovenú prípustnú mieru, aby bolo možné vykonávať samotnú fragmentáciu.

Fragmentovanie bolo uskutočnené v dvoch krokoch (primárna a sekundárna fragmentácia). Primárna fragmentácia pozostávala z rezania samotnej nádoby pomocou lanovej píly na prstence o výške cca 1 m. Sekundárna fragmentácia pozostávala z ďalšej fragmentácie odrezaných prstencov KO na oceľovom rošte so záchytnou vaňou. Pracovisko sekundárnej fragmentácie bolo umiestnené v tej istej miestnosti vedľa kompenzátora objemu. Po ukotvení prstenca na oceľovom rošte a napojení na vzduchotechnickú a filtračnú jednotku nasledovala samotná sekundárna fragmentácia pomocou rezacieho agregátu kyslík-propán. V rámci sekundárnej fragmentácie bol vykonaný samotný odber veľkorozmerných vzoriek z KO. Odber vzorky z plášt'a



KO so zvarom bol naplánovaný z oblasti kolísania hladiny. Výsledky z analýz bude možné porovnať s výsledkami analýz zo vzoriek odobraných z JE V2 EBO.



Obr. 3: Fragmentačné pracovisko KO v KP JAVYS a veľkorozmerné fragmenty z plášťa kompenzátora objemu



Obr. 4: Veľkorozmerné vzorky z plášťa a nátrubku kompenzátora objemu

Po samotnej fragmentácii veľkorozmerných vzoriek nasledovala záverečná dekontaminácia pomocou otryskávania. Na dekontamináciu boli použité dekontaminačné pracoviská DKP2 umiestnené v rámci KP JAVYS. Dekontaminačné práce boli naplánované tak, aby vzorky mohli byť uvoľnené do životného prostredia, čo bolo úspešne plnené [1].

### Hodnotenie procesov teplotného starnutia

Kompenzátor objemu, resp. materiály plášťa KO ako také, podlieha najväčšej teplotnej záťaži zo všetkých bezpečnostne významných veľkorozmerných komponentov primárneho okruhu [2]. Z tohto dôvodu majoritným degradačným mechanizmom nie je radiačné krehnutie, korózia a ani únava, ale teplotné starnutie. Počas dlhodobej teplotnej expozície na teplote 325 °C prichádza k rýchlejšim difúznym procesom, čo môže mať za následok zmenu mikroštruktúry a subštruktúry materiálov kompenzátora. Každá štruktúrna zmena vplyva na mechanické vlastnosti, ktoré nemôžu klesnúť pod prípustné hodnoty [2].

Z tohto dôvodu je potrebné poznať stav štruktúry a jej zmeny vplyvom dlhodobej teplotnej expozície v reálnych prevádzkových teplotách. Taktiež je potrebné poznať detailný stav lokálnych mikroštruktúr a subštruktúr všetkých materiálov plášťa KO, teda perlitickej ocele 22K, austenitického koróziivzdorného návaru na vnútornom povrchu plášťa, zvaru spájajúceho prstence, ako aj teplom ovplyvnenú oblasť [3].

### Experimentálne metódy

Pre získanie celistvého pohľadu na materiálové a mechanické vlastnosti materiálov KO, ako aj lokálnych oblastí ako sú zvary, teplom ovplyvnené oblasti, prechodové oblasti či trojné body a následnú možnosť vytvorenia resp. spresnenia trendov teplotného starnutia materiálov plášťa a nátrubku KO je potrebné použitie viacerých experimentálnych metód.

Aby bolo možné vykonať rôzne potrebné experimenty je neskôr potrebné zostrojiť rezacie plány a pripraviť vzorky jednotlivých veľkorozmerných fragmentov. Fragmenty sa budú deliť na menšie časti drôtom s využitím elektroiskrového rezacieho stroja. Z narezaných dielčích častí sa následne vyrobia samostatné vzorky, pre všetky potrebné experimentálne metódy.

Overenie dodaného resp. reálneho stavu materiálu a jeho porovnanie so smerodajným chemickým zložením uvedeným v technickej dokumentácii, bude vykonané vyhodnotením analýz chemického zloženia zvarového kovu, základného materiálu aj austenitického návaru.

Pre hodnotenie stavu mikroštruktúr, bude potrebné použiť rôzne zobrazovacie metódy, ako svetelnú optickú mikroskopiu (OM), elektrónovú rastrovaciu mikroskopiu (REM) a pre hodnotenie subštruktúr elektrónovú transmisnú mikroskopiu (TEM).

Jednoznačná identifikácia častíc a fáz pozorovaných v rámci mikroštruktúrnej analýzy nebude možná len na základe ich morfológie a distribúcie. Z tohto dôvodu bude realizovaná okrem elektrónovej difrakčnej analýzy pomocou TEM aj röntgenová bodová a plošná mikroanalýza častíc a fáz, ktorá dáva informáciu aj o ich chemickej povahe.

Pre objektívne vyvodenie záverov resp. vytvorenia trendov pre podporu dlhodobej prevádzky JE typu VVER-440, je potrebné overiť mechanické vlastnosti, všetkých lokalít materiálov KO spomínaných v predchádzajúcej kapitole „Hodnotenie procesov teplotného starnutia“. Z dôvodu nutnosti využitia štandardných skúšobných teliesok v prípade štandardných mechanických skúšok (napr. lomovej húževnatosti, či skúške ťahom), rozmery skúšobných teliesok nedovoľujú využitie týchto metód, pre hodnotenie vlastností lokálnych oblastí, ako sú teplom ovplyvnené oblasti. Pre lokálne oblasti bude preto potrebné využitie špeciálnych skúšobných metód, pričom využitie metódy small-punch-test, pri ktorej sa pracuje s rozmerovo malými vzorkami ( $\varnothing 8$  mm x 500  $\mu$ m), sa javí ako to najvhodnejšie. V neposlednom rade bude potrebné aj meranie tvrdosti všetkých vybraných lokalít.

### Záver

- Projekt popisovaný v článku má nenahraditeľný význam pre podporu dlhodobej prevádzky JE typu VVER-440.
- Primárnym degradačným procesom materiálov resp. určujúcim faktorom životnosti KO je kvôli jeho vysokej prevádzkovej teplote práve proces teplotného starnutia.
- Dôležité je získať informácie o zmene štruktúry materiálov v dôsledku dlhodobej teplotnej expozície pri reálnych prevádzkových teplotách.
- Je nesmierne dôležité poznať detailný stav lokálnych mikroštruktúr a subštruktúr všetkých materiálov plášťa KO, teda perlitickej ocele 22K, austenitického koróziivzdorného návaru na vnútornom povrchu plášťa, zvaru spájajúceho prstence, ako aj teplom ovplyvnenú oblasť.
- Na posúdenie materiálových vlastností bude nutné využitie aj neštandardných metód mechanických skúšok napr. small-punch-test.

- Pre tvorbu trendov teplotného starnutia materiálov KO je potrebné porovnanie výsledkov predchádzajúcich projektov a vyhodnotenie záverov z historických protokolov týkajúcich sa problematiky materiálov primárneho okruhu, nielen odstavených, ale aj stále prevádzkovaných jadrových zariadení SR.
- Výsledkom projektu budú trendy teplotného starnutia, ktoré podpora dlhodobú prevádzku JE typu VVER-440.

### Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum fyzikálnych, technických a materiálových aspektov vysokoteplotných reaktorov s potenciálom výroby vodíka, číslo projektu: 313011BUH7, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

### Literatúra

- [1] BALÁK, Miloš a kol. *Analýza odobratých vzoriek zo ZM KO na 3. bloku JE Bohunice v rámci projektu monitorovania teplotného starnutia materiálov PO JE V-2*. Trnava, VUJE, a. s., november 2016, výskumná správa, 0360/21/2016.
- [2] BALÁK, Miloš a kol. *Odber a vyhodnotenie vzoriek z kompenzátora objemu na 3. bloku JE EBO „Analýza odobratých vzoriek zvarového kovu KO EBO3“*. Trnava, VUJE, a. s., december 2017, výskumná správa, 0360/29/2017.
- [3] BALÁK, Miloš a kol. *Odber a vyhodnotenie vzoriek z kompenzátora objemu na 4. bloku JE EBO V2*. Trnava, VUJE, a. s., január 2019, výskumná správa, 0360/01/2019.

## **HODNOTENIE VZORIEK EXPONOVANÝCH V KORÓZNEJ KOMORE JADROVEJ ELEKTRÁRNI BOHUNICE**

## **EVALUATION OF THE SAMPLES EXPOSED IN THE CORROSION CHAMBER OF THE BOHUNICA NUCLEAR POWER PLANT**

Dávid Slnek <sup>a, b)</sup> a Michal Hajas <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> VUJE a.s., Okružná 5, 918 64, Trnava, Slovenská republika

<sup>b)</sup> Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu č. 2781/25, 917 24, Trnava, Slovenská republika

### **Abstrakt**

Korózna komora je určená na dlhodobé exponovanie skúšobných vzoriek konštrukčných materiálov jadrovej elektrárne. Svojím obsahom príspevok popisuje súhrn výsledkov, ktoré boli dosiahnuté pri hodnotení koróznej komory inštalovanej v JE Bohunice. Vzorky boli exponované po dobu 12 rokov, pričom sa jedná o doposiaľ najdlhšiu dobu expozície v rámci programu koróznych komôr. Pre monitorovanie koróznych procesov boli použité vzorky, ktoré umožňujú sledovať okrem rovnomernej a nerovnomernej korózie aj korózne praskanie. Výsledky analýz v predkladanom príspevku dokazujú vysokú koróznou odolnosť konštrukčnej austenitickej Cr-Ni ocele typu 08Ch18N10T.

### **Abstract**

The corrosion chamber is designed for long-term exposure of test samples of construction materials of the nuclear power plant. The content of the contribution describes a summary of the results that were achieved during the evaluation of the corrosion chamber installed on the Bohunice NPP. The samples were exposed for 12 years, which is the longest exposure time so far within the corrosion chamber program. Samples were used to monitor corrosion processes, which allow monitoring, in addition to uniform and uneven corrosion and corrosion cracking. The results of the analyzes in this paper prove the high corrosion resistance of structural austenitic Cr-Ni steel 08Ch18N10T.

### **Úvod**

Pre spoľahlivú a bezpečnú prevádzku jadrových elektrární (ďalej len JE) je potrebné mať k dispozícii celý rad informácií o stave prevádzkovaných blokov. Medzi tieto informácie patria aj údaje o koróznej situácii bezpečnostne významných zariadení. Počas viac než 45-ročnej histórie od vzniku VUJE sa oddelenie štrukturálnych analýz podieľa na riešení množstva problémov súvisiacich s koróziou konštrukčných materiálov.

V príspevku je popísaný súhrn výsledkov, ktoré boli dosiahnuté pri vyhodnotení vzoriek exponovaných v koróznej komore JE EBO V2 [1].

Korózna komora má z hľadiska použitia charakter jednoúčelového, neprenosného zariadenia, ktoré je určené na dlhodobé exponovanie skúšobných vzoriek materiálov primárneho okruhu v originálnych prevádzkových podmienkach. Teleso prietokovej komory koróznej slučky je valcového tvaru, v ktorom sú v dištančnej sústave uložené skúšobné vzorky tak, že chladiace médium primárneho okruhu môže medzi nimi voľne prúdiť [2]. Detailný opis konštrukčného riešenia koróznej komory je popísané v [3].

### **Použité typy vzoriek**

Pre monitorovanie koróznych procesov v koróznej komore sú použité vzorky, ktoré umožňujú sledovať okrem rovnomernej a nerovnomernej korózie aj korózne praskanie, štrbinovú a bodovú koróziu. Pozornosť sa pritom sústredila na počiatočné štádium korózneho procesu a na etapu rozvoja koróznej trhliny. Pre monitorovanie boli použité nasledujúce typy vzoriek:



- 4ks predopnuté 0,5-CT (compact tension) telesá,
- 2ks predopnuté ťahové vzorky,
- 1ks predopnuté ťahové vzorky z parogenerátorovej (PG) rúrky,
- 2ks vzorky typu CBB (crevice bend beam).

Vyrobené vzorky boli do jednotlivých modulov osádzané tak, aby vytvorili samostatné série, ktoré by umožňovali po expozícii a vyhodnotení získať komplexné informácie o stave materiálu z korózneho hľadiska. Detailný popis jednotlivých vzoriek je uvedený v [3].

### Prehľad dosiahnutých výsledkov

Po 12 ročnej expozícii sa na povrchu všetkých vzoriek nachádzala korózna vrstva, v ktorej boli viazané rádioaktívne izotopy čoho dôsledkom bola povrchová kontaminácia z aktivovaných korózných produktov v primárnom okruhu. Aby bolo možné analyzovať povrch vzoriek, bolo potrebné túto vrstvu odstrániť dvojstupňovou mäkkou dekontamináciou. Cieľom dekontaminácie bolo odstránenie oxidových vrstiev z hodnotených povrchov bez ich negatívneho ovplyvnenia.

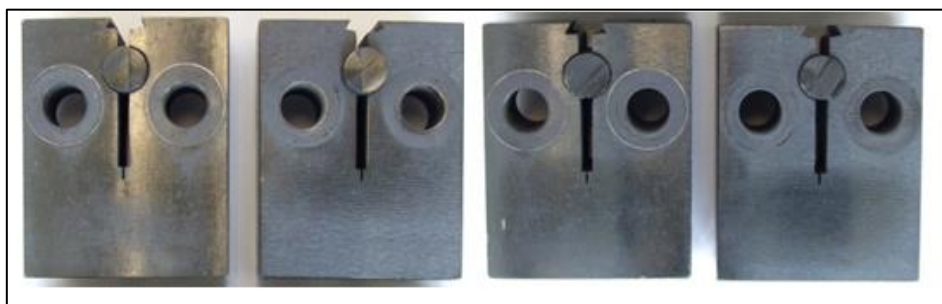
#### Výsledky analýz vzoriek typu 0,5-CT telies

Vyhodnotenie týchto vzoriek spočíva v určení poklesu zaťaženia, ktorým boli vzorky pôvodne predopnuté, resp. v zmeraní prírastku trhliny vplyvom predopnutia v danom koróznom prostredí. Vyhodnocovanie sa vykonáva na špeciálnom skúšobnom zariadení – dostatočne výkonnej trhačke, vybavenej systémom merania rozovretia trhliny na CT telese. Na 4 ks 0,5-CT telies boli overené predpínacie sily aplikované prostredníctvom klinov. V tabuľke 1 sú uvedené výsledky skúšky, kde sú pre jednotlivé telesá sumarizované hodnoty stanovených predpínacích síl, odpovedajúcich roztvoreniu a zistených síl, pri ktorých bol vytiahnutý klin.

Tab. 1: Prehľad východiskových a stanovených parametrov predpnutia

Označenie CT	Zistená predpínacia sila $F_s$ [kN]	Zistené roztvorenie $P_s$ [mm]	„Odklinovacia“ sila $F_{Smax}$ [kN]	Pôvodná predpínacia sila [kN]
4	3,95	0,0107	4,50	4,56
8	3,72	0,0054	3,00	5,60
12	-	-	0,00	6,52
16	6,28	0,0148	6,00	8,13

Prehliadkou vzoriek (obr. 3) pod stereomikroskopom sa na ich lomových plochách pozorovali oblasti predcyklovanej trhliny a oblasti dolomenia. Lomové plochy vzoriek boli bez nápadného prejavu zmeny charakteru lomovej plochy na hranici predcyklovania a dolomenia.

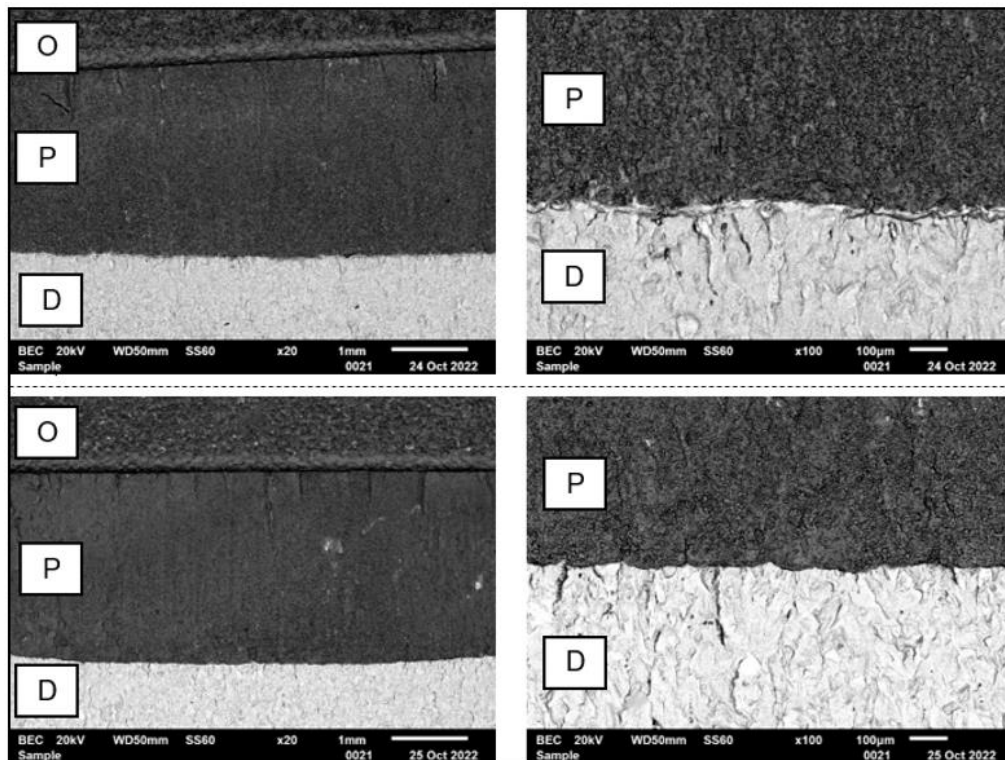


Obr. 1: Vzorky typu 0,5-CT po expozícii

Detailné analýzy lomových plôch pomocou REM v sekundárne emitovaných elektrónoch (SE) ako aj v späťe odrazených elektrónoch (BSE) potvrdili, že sa jedná o identický charakter



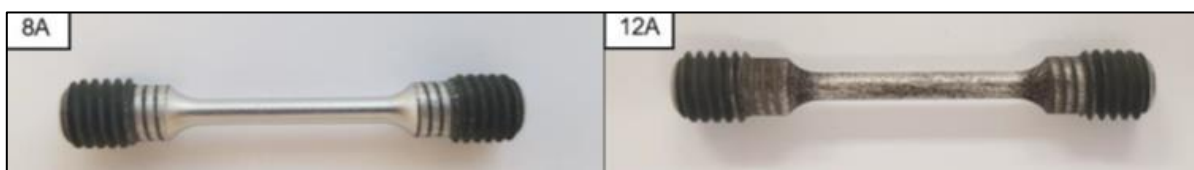
lomu pri predcyklovaných trhlinách, ako aj pri dolomení skúšobných telies rozcyklovaním. Séria snímok na obr. 2 zobrazuje lomové plochy vzoriek s označením „4“ (hore) a „16“ (dole), ktorých vrubom bola únavová trhlinka. Každá vzorka je reprezentovaná dvoma snímkami. Jedným prehľadovým, na ktorom je vidieť rozhranie mechanického opracovania aj rozhranie čela trhliny. Z uvedeného je zrejmé, že počas expozície vzoriek neprišlo k nárastu trhliny vplyvom korózneho praskania pod napätím.



Obr. 2: Lomové plochy (SEM). Prehľadový (vľavo) a detail (vpravo): O-hranica opracovaného vrubu, P-predcyklovanie, D-dolomenie.

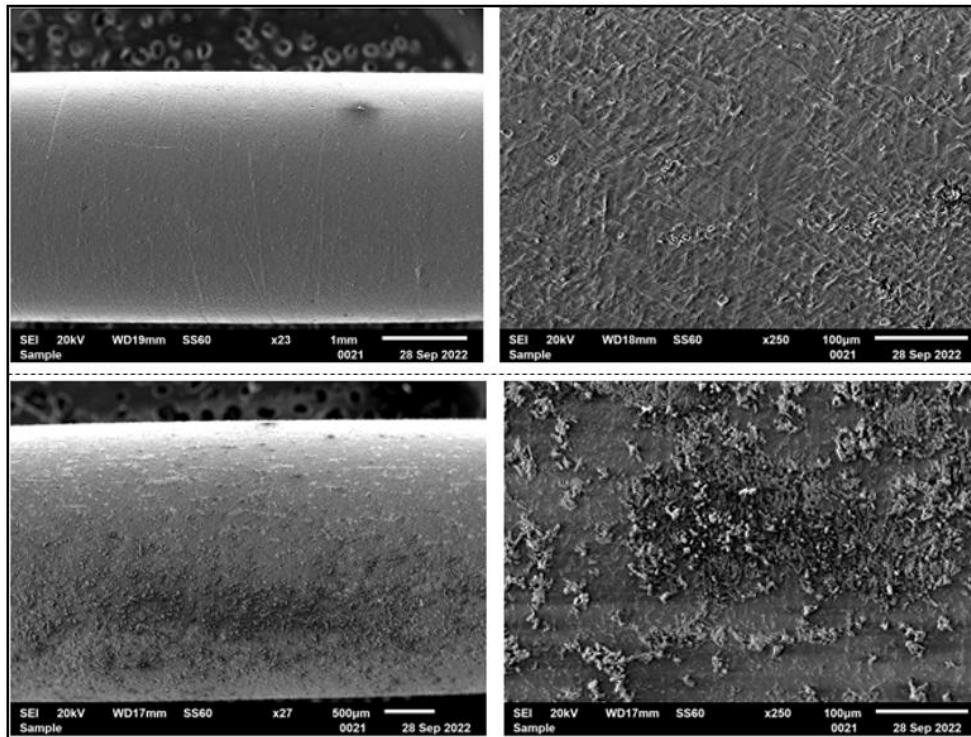
#### Výsledky analýz predopnutých ťahových vzoriek

Na obr. 3 sú zobrazené ťahové vzorky, po vytiahnutí z predpínacích rámečkov. Vizúálnou prehliadkou preukázala, že vonkajší povrch vzoriek bol značne pokrytý koróznymi produktmi, ktoré zostali zachované aj po dekontaminácii.



Obr. 3: Ťahové vzorky vybrané z rámečku po expozícii

Z dôvodov presnejších analýz boli vzorky dekontaminované, za účelom odstránenia oxidových nánosov. Pomocou REM bolo pozorovaných 90 % funkčných plôch po obvode jednotlivých ťahových vzoriek (obr. 4 „8A“ hore, „12A“ dole). Počas podrobnej prehliadky pomocou REM neboli na povrchu vzoriek pozorované žiadne významné indikácie resp. defekty. V ojedinelých prípadoch sa potvrdil výskyt osamotených korózných jamiek, ktoré sa tvorili na miestach defektov, vzniknutých počas výroby materiálu. Povrch oboch vzoriek je bez napadnutia hraníc zŕn či iného výrazného korózneho napadnutia. Analýza nepreukázala prítomnosť žiadnych makro a mikrotrhlín šíriacich sa v smere od povrchu do hĺbky materiálu.



Obr. 4: Predopnuté ťahové vzorky (SEM): prehľadová snímka (vľavo), detail (vpravo)

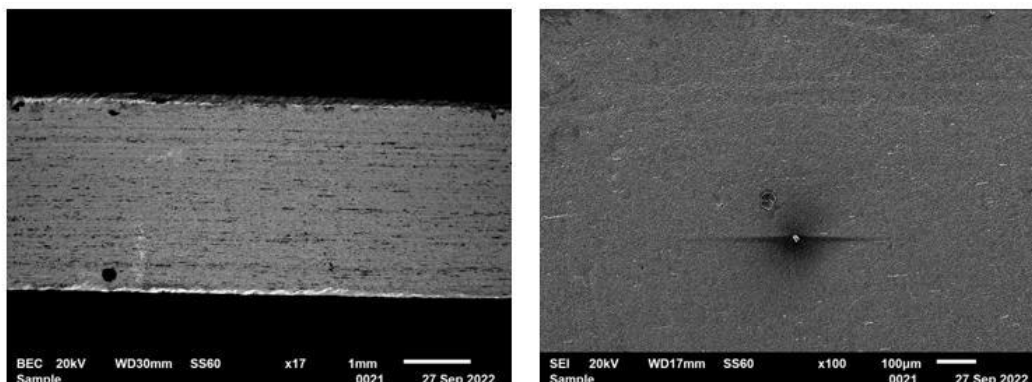
**Výsledky analýz predopnutých ťahových vzoriek z PG rúrky**

Obr. 5 dokumentuje vzorku z PG rúrky. Oblasť záujmu pri sledovaní bola dvojica vonkajších plôch úzkych stredových pásov vzniknutých odfrézovaním vyznačené červenou šípkou.



Obr. 5: Predopnutá PG rúrka po dekontaminácii

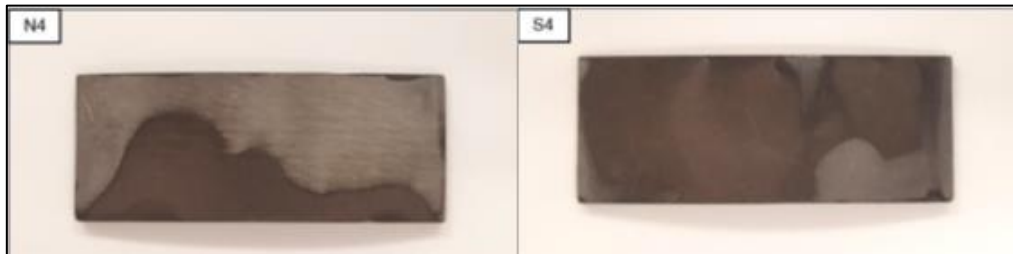
Snímka na obr. 6 dokumentuje povrch vzorky. Analýza nepotvrdila trhliny od mechanizmu korózneho praskania. Žiadne trhliny ani ich prípadné počiatkové štádia zrodu neboli pozorované.



Obr. 6: Povrch vzorky PG rúrky (SEM)

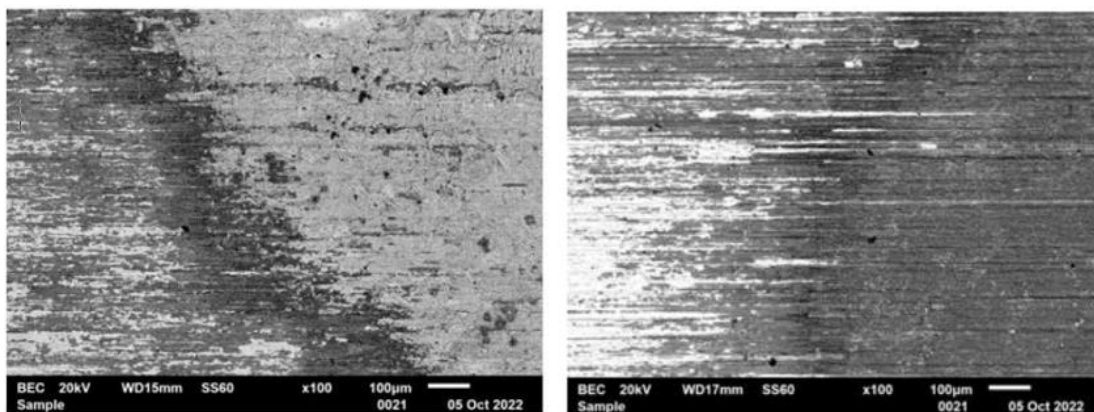
### Výsledky analýz vzoriek typu CBB

Po vytažení exponovaných vzoriek typu CBB bolo približne 50 % povrchu vzorky s označením „N4“ pokrytých vrstvou korózných nánosov, v prípade vzorky s označením „S4“ až vyše 85% povrchu (vid' obr. 7 – tmavé oblasti). Táto vrstva zostala zachovaná aj po dekontaminácii. Tmavé oblasti vznikli vplyvom prúdenia média a usádzaním korózných splodín nachádzajúcich sa v prostredí primárneho okruhu.



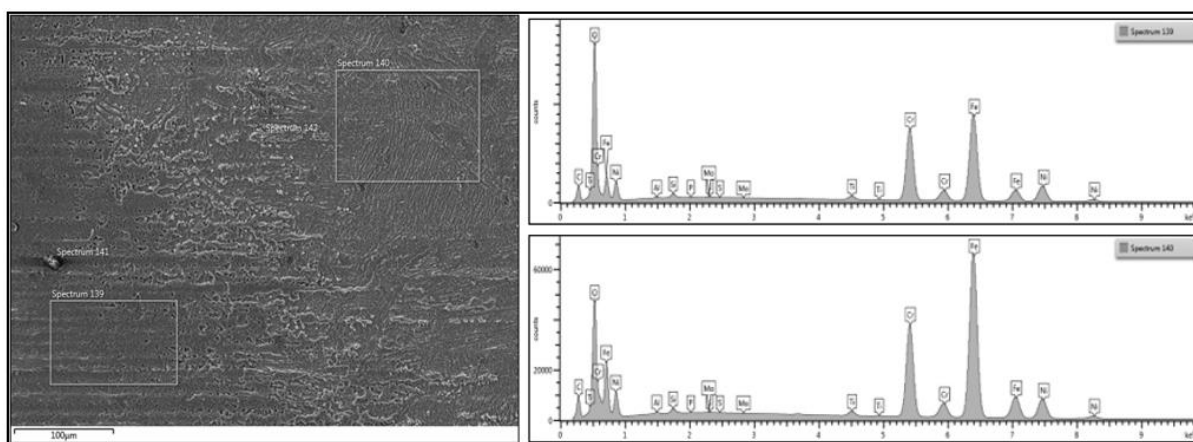
Obr. 7: Vzorky typu CBB po expozícií

Obr. 8 zobrazuje stav povrchu vzoriek s označením „N4“ (vľavo) a „S4“ (vpravo), kde možno vidieť prechod medzi oblasťou pokrytou koróznymi nánosmi s oblasťou bez týchto nánosov. Povrch vzorky s označením „S4“, bol pokrytý značne rozsiahlejšou oblasťou korózných úsad. Na povrchu bol pozorovaný ojedinelý výskyt korózných jamiek.



Obr. 8: Vzorky typu CBB (SEM)

Obr. 9 dokumentuje záznam z EDX analýzy vzorky s označením „N4“, ktorej približne 50% plochy bolo pokrytej oxidickými vrstvami na báze železa.



Obr. 9: Záznam z EDX analýzy vzorky typu CBB „N4“



## Závěry

Na hodnotenie koróznej stability austenitickej Cr-Ni ocele typu 08Ch18N10T, boli použité štyri druhy vzoriek, ktoré mali za úlohu sledovať širokú škálu možného korózneho poškodenia. Materiálové analýzy na týchto vzorkách, vyťahnutých z koróznej komory inštalovanej v JE EBO V2 po 12 ročnej expozícii nepreukázali významné známky závažného korózneho napadnutia. Prvé známky vplyvu korózneho média sa prejavovali na povrchoch jednotlivých vzoriek, kde dochádzalo k ich pokrytiu oxidickými fázami a koróznymi nánosmi. Taktiež miesta, v ktorých sa vyskytovali defekty, vnesené pri výrobe materiálu, boli poznačené koróznym prostredím primárneho média.

## Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum fyzikálnych, technických a materiálových aspektov vysokoteplotných reaktorov s potenciálom výroby vodíka, číslo projektu: 313011BUH7, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Literatura

- [1] KUPČA, Ľudovít a BŘEZINA, Martin. Operational environment influence monitoring on the corrosion behaviour of WWER-440 primary piping materials. In: *EUROCORR'97*. Trondheim, September 1997.
- [2] BŘEZINA, Martin, KUPČA, Ľudovít a BALÁK, Juraj. Monitorovanie korózie v jadrove-energetických zariadeniach SR. In: *Korózia v energetike 2004*. Košice, 2004.
- [3] SLNEK, Dávid a HAJAS, Michal. Monitorovanie korózných procesov v primárnom okruhu jadrových elektrárníach typu VVER-440 s využitím korózných slučiek. In: *Životnost komponent energetických zařízení*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2022, s. 123-128. ISBN 978-80-261-1109-2.

## **VYSOKOTEPLOTNÍ KOROZE VYBRANÝCH NIKLOVÝCH SLITIN V PROSTŘEDÍ TECHNICKÉHO DUSÍKU A HELIA PRO POUŽITÍ V JADERNÉ ENERGETICE**

### **HIGH-TEMPERATURE CORROSION OF SELECTED NICKEL ALLOYS IN THE ENVIRONMENT OF TECHNICAL NITROGEN AND HELIUM FOR USE IN NUCLEAR ENERGY**

Josef Cízner a Jan Hruška

SVÚM a.s.

#### **Abstrakt**

Laboratorní zkoušky vybraných niklových slitin při teplotě 850 °C a době expozice 10 000 hodin v prostředí technického dusíku a helia. Hodnocení vzorků gravimetricky, metalograficky a mikroanalýzou.

Výsledky budou použity při výzkumu jaderných bloků 4 generace.

#### **Abstract**

Laboratory tests of selected nickel alloys at a temperature of 850 °C and an exposure time of 10,000 hours in an environment of technical nitrogen and helium. Evaluation of samples by gravimetric, metallographic and microanalysis.

The results will be used in the research of nuclear blocks of the 4th generation.

#### **Úvod**

Pro plynem chlazené rychlé reaktory 4 generace – GFR, které jsou na primární straně chlazené heliem, které se velmi špatně těsní, se uvažuje v sekundárním okruhu o chladicí směs cca 85 % dusíku a 15 % helia, aby se co nejvíc omezil průnik chladiva z primárního okruhu do sekundárního.

Prakticky celý sekundární okruh se dá zevnitř tepelně izolovat, tak, aby konstrukční materiály nebyly vystaveny přímo vysokým teplotám. Výjimkou je tepelný výměník, kde to z principu není možné. Výzkum odolnosti ocelí používaných v tepelných výměnících ukázal, že už při teplotách okolo 750 °C je při dlouhodobé expozici životnost zkrácena na cca 10-15 let, což by při předpokladu životnosti elektrárny minimálně 60 let znamenalo nutnost opakované výměny teplosměnné části hlavního tepelného výměníku, což je u jaderných reaktorů značně problematická a velmi nákladná záležitost. Jednoznačně z toho vyplynula potřeba vybrat jiný materiál pro teplosměnné elementy hlavního tepelného výměníku v GFR, kde se vstupní teplota na primární straně pohybuje mezi 800 °C a 900 °C.

Pro naše experimenty byly zvoleny niklové slitiny, certifikované pro jadernou energetiku.

#### **Vybrané slitiny**

Vzhledem k vysoké provozní teplotě i pro využití v jaderné energetice byly zvoleny niklové slitiny, modifikované dalšími legurami – W, B, Nb, Co a dalšími. Jejich chemické složení je uvedeno v tabulce 1.

#### **Laboratorní zkoušky**

Dlouhodobé laboratorní zkoušky probíhají v plynotěsných muflových pecích při teplotě 850 °C v prostředí dusíku a 10% helia.

Od každého materiálu bylo exponováno 6 vzorků, uložených v korundových lodičkách a exponovaných po dobu 200, 500, 1 000 a 10 000 hodin.



Po výše uvedených časových expozicích byly vzorky gravimetricky hodnoceny, po 10 000 hodinách bylo celkové hodnocení doplněno o vyhodnocení metalografické a o mikroanalýzu na mikroanalýzátoru Cameba.

## Vyhodnocení výsledků

### Gravimetrické měření

Vzorky po expozici byly zváženy a průměrná hodnota u všech slitin byla pro různé doby expozice vynesena do obr. 1. Pro přehlednost byly pro expozici 10 000 hodin vyneseny naměřené hodnoty do sloupcového diagramu – obr. 2.

Naměřené hodnoty jsou velmi nízké od cca 5 do 11 g/m<sup>2</sup>. Svědčí to o velmi dobré korozní odolnosti zkoušených slitin.

### Metalografické hodnocení a mikroanalýza

Ze vzorků po expozici byly po době 1000 hodin zhotoveny metalografické výbrusy a po elektrolytickém leptání v 10% kyselině šťavelové byla hodnocena struktura slitin i vzniklá korozní vrstva na povrchu.

#### Slitina 617B

Na obr. 3 je zachycena slitina 617B v neleptaném stavu. Kompaktní korozní vrstva na povrchu má tloušťku 343–378 μm, difuze do základního materiálu do hloubky 50 μm.

#### Slitina 625

Tloušťka korozní vrstvy včetně difuze kyslíku do základního materiálu je na úrovni 118,6 μm (obr. 4).

#### Slitina HR160

Tloušťka korozní vrstvy je opět minimální – cca 112 μm. Je patrné korozní napadení povrchu pod touto vrstvou a dále výrazná precipitace v základním materiálu (obr. 5).

#### Slitina HR230

Tloušťka korozní vrstvy je 41 až 80 μm, oxidace probíhá po hranicích austenitických zrn (obr. 6).

#### Slitina 600

Tloušťka korozní vrstvy je 44 až 89 μm.

### Mikroanalýza

Mikroanalýzou na přístroji CAMEBAX jsme u všech slitin analyzovali kvalitativně i kvantitativně jednak korozní vrstvy a dále i složení vyloučených fází.

V tabulce 2 je uvedeno složení korozních vrstev. Jedná se vždy o oxidickou vrstvu, zpravidla s vyšším obsahem chromu s přítomností dalších legur. U slitin 617B, HR160 je navíc přítomen nikl, u slitiny HR230 wolfram. V menším množství je přítomen i Mo nebo Co.

## Závěry

Zkoušky vybraných slitin při teplotě 950 °C v prostředí dusíku a helia prokázaly na vnějším povrchu vzorků vznik kompaktní oxidické vrstvy o tloušťce od 40 do 380 μm. Její vznik je způsoben přítomností velmi malého obsahu kyslíku v tlakové lahvi.

Vyloučené fáze a precipitáty u zbývajících slitin jsou na bázi karbidů.

Tento projekt byl spolufinancován Technologickou agenturou ČR v rámci programu Théta v projektu TK01030089.

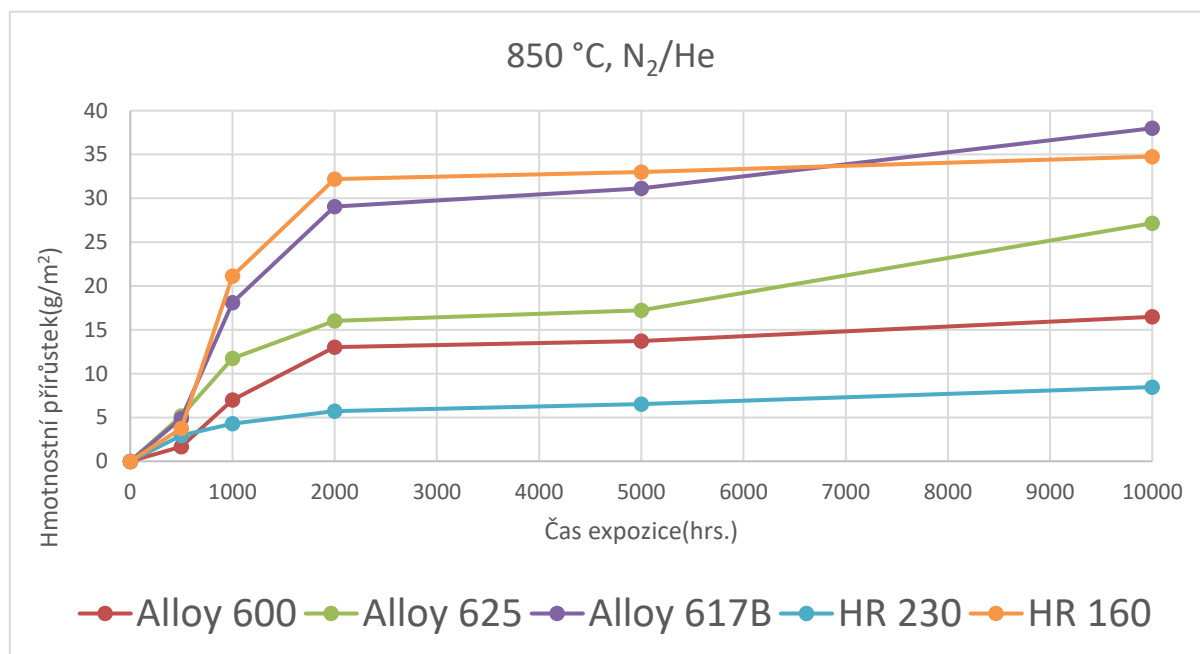
Tab. 1: Chemické složení vybraných slitin

	C	S	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Ti	Cu
<b>617B</b>	0,059	0,002	22,32	55,05	0,02	0,11	8,77	0,46	0,01
<b>625</b>	0,025	0,01	21-23	zbytek	0,46	0,4	8-10	0,4	
<b>HR160</b>	0,05		28	37	0,5	2,75	1	0,5	
<b>HR230</b>	0,1		22	zbytek			2		
<b>600</b>			15	76					

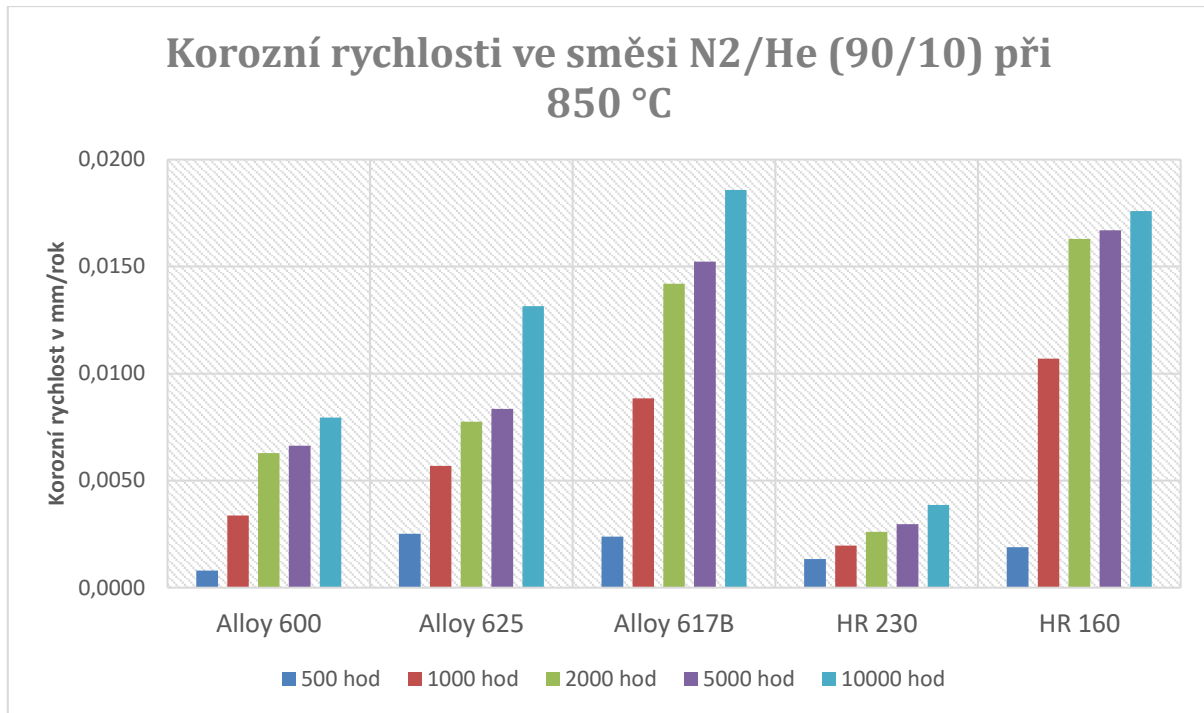
	Fe	P	Al	Pb	Co	B	Nb	W	N
<b>617B</b>	0,64	0,002	1,05	0,0002	11,49	0,004			
<b>625</b>			0,4				3,2-3,8		
<b>HR160</b>					29	0,004	1	1	0,11
<b>HR230</b>					5			14	
<b>600</b>	8								

Tab. 2: Chemické složení korozních vrstev

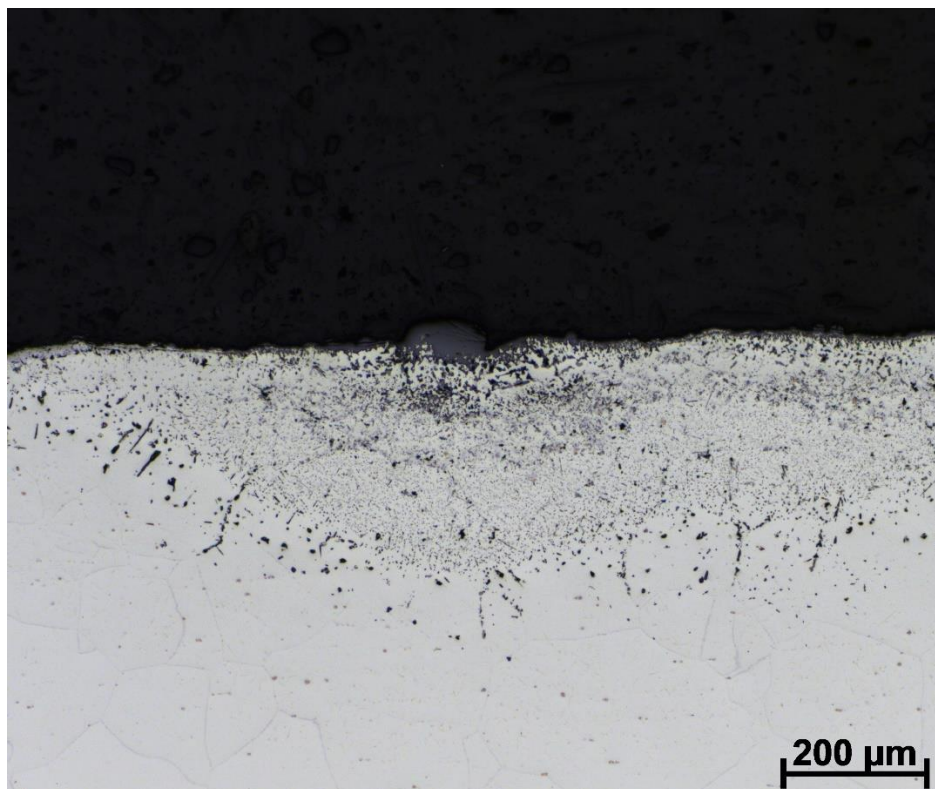
Slitina	Měřené místo	Kvantitativní mikroanalýza
<b>617B</b>	Korozní vrstva	34% O <sub>2</sub> + 33% Cr + 26% Ni + 3,8% Mo
<b>625</b>	Korozní vrstva	41% O <sub>2</sub> + 46% Cr + 3% Ni
<b>HR160</b>	Korozní vrstva	33% O <sub>2</sub> + 36% Cr + 5% Co + 22% Ni
<b>HR230</b>	Korozní vrstva	36,6% O <sub>2</sub> + 35,5% Cr + 17,8% W + 5% Ni + 2,3% Co



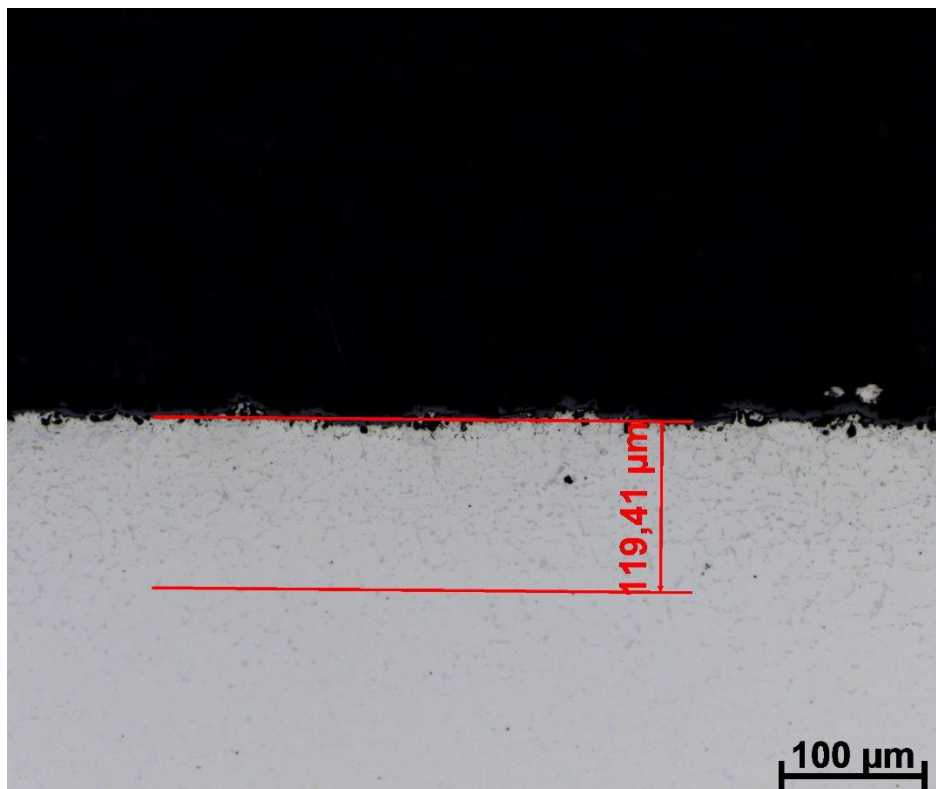
Obr. 1: Průměrná hodnota hmotnostního přírůstku zkoušených slitin



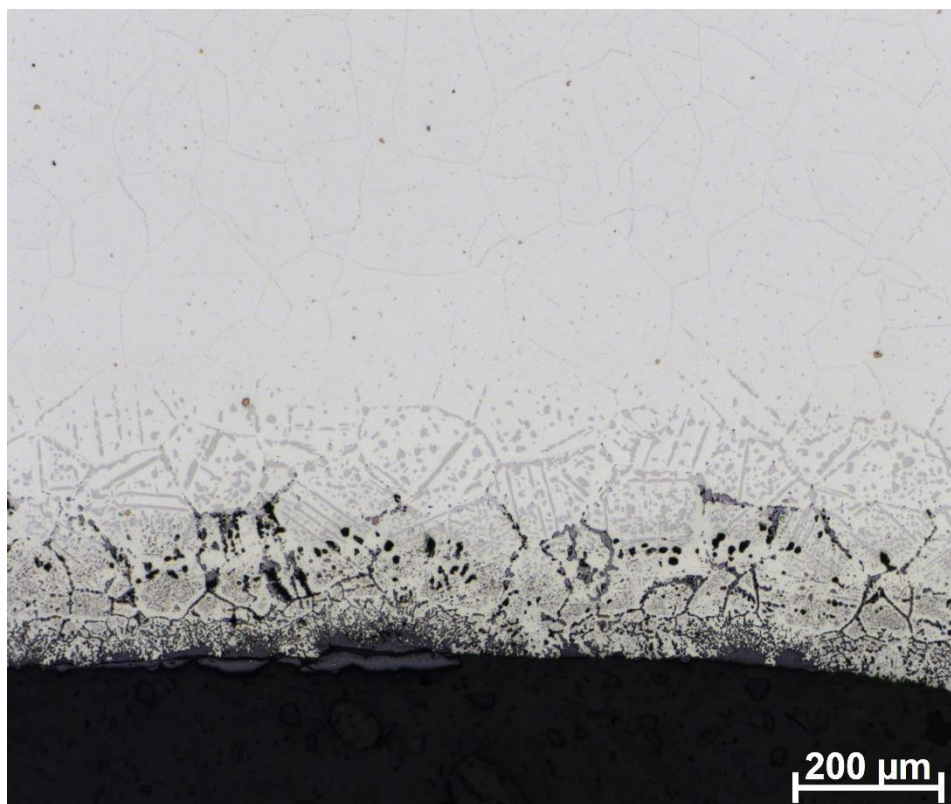
Obr. 2: Korozní rychlost zkoušených slitin



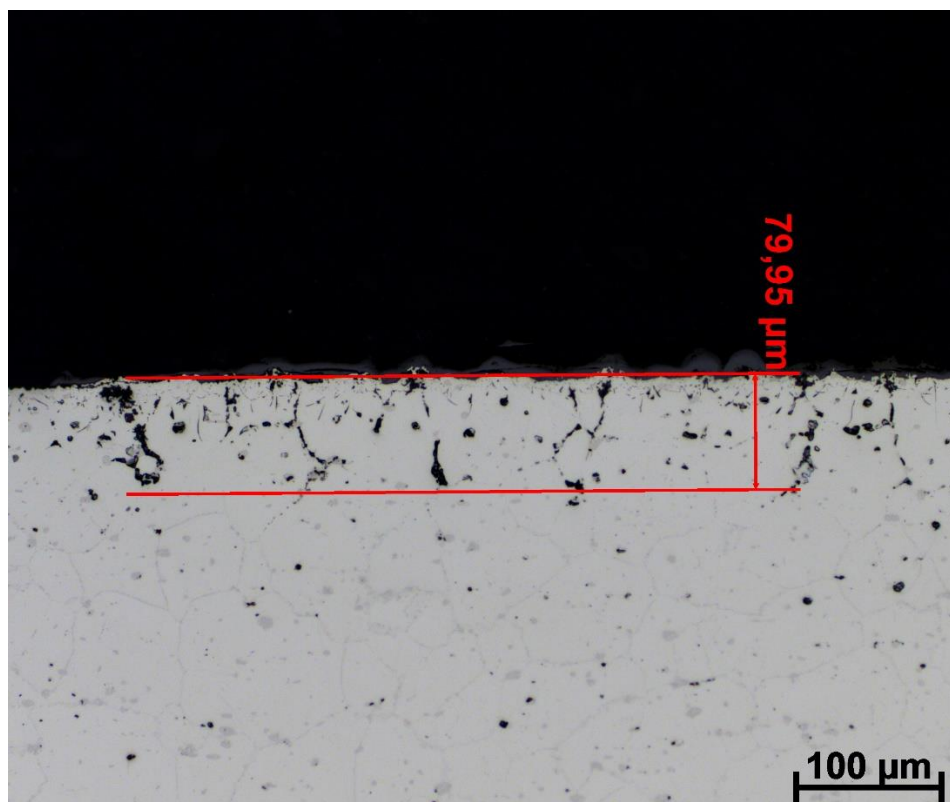
Obr. 3: Korozní vrstva slitiny 617B



Obr. 4: Korozní vrstva slitiny 625



Obr. 5: Korozní vrstva slitiny HR160



Obr. 6: Korozní vrstva slitiny HR230



## CREEPOVÉ ZKOUŠKY ZIRKONIOVÝCH POVLAKOVÝCH TYČÍ JADERNÉHO PALIVA A JEJICH INTERPRETACE

### CREEP TESTS OF ZIRCONIUM FUEL CLADDING TUBES AND THEIR INTERPRETATION

Václav Sklenička <sup>a)</sup>, Květa Kuchařová <sup>a)</sup>, Luboš Kloc <sup>a)</sup>, Jiří Dvořák <sup>a)</sup>, Petr Král <sup>a)</sup>, Marie Kvapilová <sup>a)</sup>, Věra Vrtílková <sup>b)</sup> a Jakub Krejčí <sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Žižkova 22, 616 62 Brno

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

#### Abstrakt

Časově závislá plastická deformace-creep je jedním z nejdůležitějších degradačních faktorů, určujících životnost zirkoniových slitin, určených k pokrytí jaderného paliva vodou chlazených reaktorů v jaderné energetice. Příspěvek je věnován creepovým zkouškám povlakových tyčí slitiny Zr1%Nb (modifikace slitiny E110) používaných v reaktorech typu VVER. Vedle standardní creepové zkoušky při konstantním tahovém napětí bude demonstrována nestandardní speciální creepová zkušební metoda umožňující měření velmi malých creepových deformací při napětích blízcích se reálným podmínkám namáhání v reálné praxi.

#### Abstract

Time-dependent plastic deformation – creep is one of the most important degradation factors which govern the life of zirconium alloys used as fuel cladding materials in the light water reactor in the nuclear power industry. This work aims to describe creep testing of Zr1%Nb (modified E110 alloy) cladding tubes used in the VVER-type reactor. In addition to a standard creep testing method under constant tensile test a nonstandard special creep testing method which has been developed to measure very small creep strains at stresses corresponding to the loading in real service.

#### Úvod

Zirkoniové slitiny palivového pokrytí v podmínkách reaktorového provozu i mimo reaktor (bazény výměny a skladování paliva) jsou vystaveny společnému působení řady degradačních procesů, především mechanickému namáhání (creepu), nestabilitě mikrostruktury, radiačnímu poškození, nízkoteplotní a vysokoteplotní oxidaci, difúzi vodíku a kyslíku při interakci s chladivem i palivem a dalším nepříznivým jevům [1, 2]. V mnohých situacích je dominujícím degradačním jevem creepová deformace a porušení materiálu [3, 4].

Pro bezpečný provoz palivového pokrytí a zejména pro realistickou predikci creepové životnosti materiálů povlakových tyčí je nezbytná znalost řady fyzikálně-metalurgických parametrů. Existuje mnoho variant creepových zkoušek [5]. V současné době jsou k dispozici v rozhodující míře především výsledky standardních zkoušek při konstantním aplikovaném zatížení (tzv. stress rupture tests), většinou bez záznamu časové závislosti creepové deformace. Výsledky těchto zkoušek jsou zpravidla prezentovány formou fenomenologických empirických rovnic. Výsledky umožňují porovnání výsledných (zpravidla lomových) vlastností materiálů při jejich volbě, popis chování zatěžovaných materiálů a případné zohlednění synergetického působení je obtížné.

Mnohem komplexnější soubor poznatků o creepovém chování a vlastnostech zkoumaných materiálů poskytují standardní creepové zkoušky při konstantním aplikovaném napětí (constant stress loading) zpravidla s plynulou registrací časové závislosti creepové deformace. S ohledem na nutnost použití speciálních creepových zkušebních strojů a větší náklady je tento typ zkoušek málo rozšířen a používán především v akademickém základním výzkumu při aktivační analýze creepových dat.

Obecným problémem obou technik je spolehlivá extrapolace creepových dat, získaných převážně z oblastí vysokých aplikovaných napětí s vyšší rychlostí creepové deformace pomocí relativně krátkodobých creepových zkoušek.

Mnohem realističtější přístup k výzkumu creepového chování spočívá v možnosti přímého experimentálního stanovení creepových vlastností povlakového pokrytí (povlakových trubek) jaderného paliva za podmínek při kterých probíhá creepová deformace velmi pomalu, takže není standardními metodami creepových zkoušek měřitelná. Příkladem je metodika creepových zkoušek využívající techniky helikoidních vzorků [6, 7].

V další části příspěvku se zaměříme na reprezentaci příkladů standardních creepových zkoušek při konstantním napětí a nestandardních creepových zkoušek pomocí techniky helikoidních vzorků, které byly provedeny na povlakových trubkách zirkoniových slitin Zr-1 % Nb (slitiny E110G2 (1,1 hm.% Nb) a E 110ETE (1,01 hm.% Nb)).

### Creepové zkoušky zirkoniových povlakových trubek při konstantním aplikovaném napětí

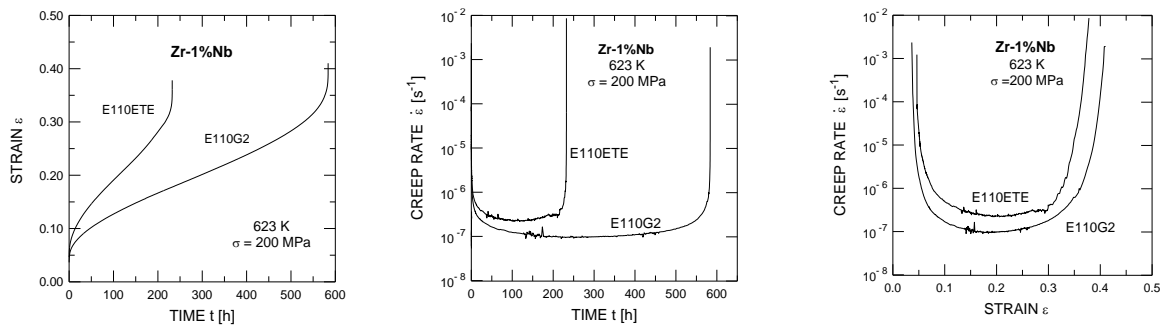
Slitiny E110G2 a E110ETE (chemické složení slitin se dále mírně liší obsahy ppm Fe,C,a O) byly získány ve formě reálných tenkostěnných povlakových trubek (vnější průměr 9,13 mm, tloušťka stěny 0,7 mm u E110G2 a 0,6 mm u E110ETE) v rekrystalizovaném stavu. Z trubek byly vyrobeny segmenty o délce 80 mm, které byly přímo použity jako creepové vzorky (po upnutí v čelistích creepového stroje představovala měrná délka vzorku 50 mm) – obr. 1.



Obr. 1: Neexponovaný trubkový creepový vzorek před creepovou zkouškou a přetržený creepový vzorek po creepu při teplotě 400 °C a 125 MPa (doba do lomu 647 hodin)

Isotermické creepové zkoušky při konstantním tahovém napětí v rozmezí 5 až 225 MPa byly provedeny při zkušebních teplotách 350 až 900 °C, které odpovídají fázovým oblastem  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  a  $\beta$ -Zr. Zkušební teploty byly stabilizovány v rozmezí  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Creepové prodloužení bylo v průběhu zkoušky spojitě měřeno a zaznamenáno a následně vyhodnoceno počítačem. Detailní popis zkoumaných zirkoniových slitin i použité experimentální techniky a metodiky lze nalézt v práci Skleničky et al. [8].

Charakteristický průběh časové závislosti creepového prodloužení  $\varepsilon$  znázorňuje standardní creepová křivka na obr. 2a. Ke zřetelnému určení jednotlivých stadií creepové křivky (primární, sekundární či stacionární a závěrečné terciární oblasti) [3, 4] a především k rigoróznímu určení hodnoty stacionární či minimální rychlosti creepu jsou určeny modifikované verze standardní křivky, znázorněné na obr. 2b a 2c. Stanovení hodnot minimální či stacionární rychlosti creepu je nezbytné pro řadu navržených parametrických rovnic pro predikci creepové životnosti a mezní plasticity, ale i pro identifikaci působících creepových deformačních mechanismů. Navíc, přesné vymezení oblasti primárního creepu, ve které dochází k poklesu rychlosti creepové deformace v důsledku dislokačního zpevnění materiálů může být užitečným ukazatelem pro stanovení mezní deformace pro kritéria bezpečného provozu zatěžovaných komponent.



Obr. 2: Rozdílné creepové křivky slitin E110G2 a E110ETE: (a) standardní creepová křivka, (b) a (c) modifikované creepové křivky (creep při teplotě 350 °C a napětí 200 MPa) [8]

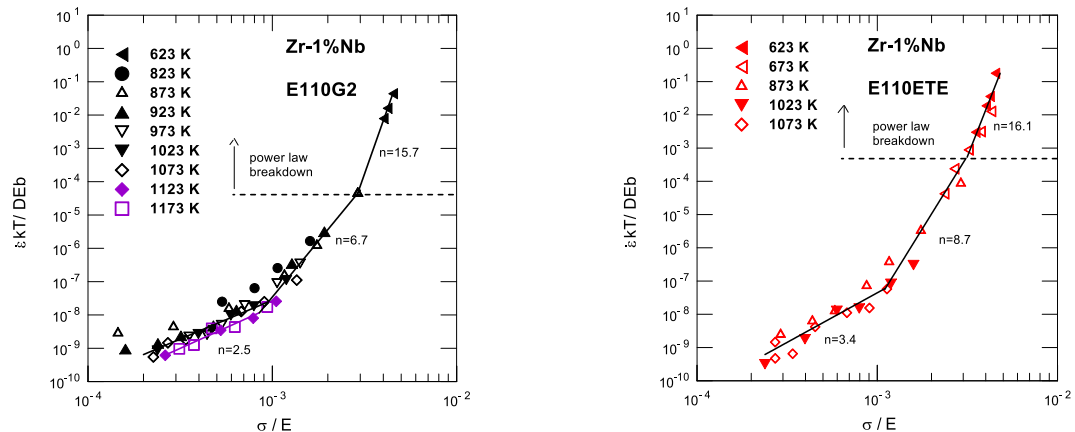
Pro realistickou predikci creepového chování povlakových trubek v provozu reaktoru i při skladování paliva je nezbytná znalost působících deformačních mechanismů a jejich kinetika. Při identifikaci creepových mechanismů se zpravidla vychází z analýzy závislosti rychlosti creepu  $\dot{\epsilon}$  na napětí  $\sigma$  a teplotě  $T$ . Obecně je vztah mezi rychlostí creepu  $\dot{\epsilon}$  a působícím napětím  $\sigma$  a teplotou  $T$  popsán konstitutivním vztahem [3, 4]

$$\dot{\epsilon} = A (\sigma)^n \exp(-Q_C/kT). \quad (1)$$

V uvedeném vztahu je  $A$  materiálová bezrozměrná konstanta,  $n = (\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln \sigma)_T$  napětíový exponent rychlosti creepu,  $Q_C = [\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial (-1/kT)]_\sigma$  aktivační energie creepu a  $k$  je Boltzmannova konstanta. Pomocí experimentálně stanovených hodnot exponentu  $n$  a případně aktivační energie creepu  $Q_C$  lze identifikovat působící deformační mechanismus či mechanismy, řídící rychlost creepu v dané oblasti creepu. Podle současných představ [1, 8] byly shledány čtyři rozdílné oblasti termálního creepu zirkonia a zirkoniových slitin, které jsou determinovány relevantními hodnotami napětíového exponentu  $n$ . V oblasti nízkých hodnot napětí  $\sigma$  a vysokých teplot  $T$ , kde  $n \sim 1$ , dochází k difúznímu creepu, realizovanému pohybem vakancí mechanismy objemové difúze či difúze po hranicích zrn [3, 4]. Zvýšení hodnot aplikovaného napětí  $\sigma$  při dané teplotě vede k oblasti creepu s exponentem  $n \sim 2$  až 3, kontrolovaném pokluzou po hranicích zrn či viskozním creepem s dominujícím skluzovým pohybem dislokací [1, 3]. Největší rozsah výzkumu creepového chování zirkoniových slitin byl věnován oblasti mocninového dislokačního creepu (power-law creep) [1, 3, 4, 8], charakterizovanému středními hodnotami aplikovaného napětí a zkušebních teplot. Této oblasti creepu odpovídají hodnoty exponentu  $n \sim 4$ -8 a rychlost creepu je kontrolována šplhem mobilních dislokací. Konečně při nejvyšších hodnotách aplikovaného napětí (např.  $\sigma/E \geq 3 \times 10^{-3}$ ) dochází k nestabilitě plastické deformace, označované v literatuře jako exponenciální creep („power-law breakdown“), při které  $n \geq 10$ . Této oblasti byla dosud věnována omezená pozornost a předpokládá se, že deformační dislokační mechanismy budou obdobné jako u mechanických tahových zkoušek [9].

Pro ilustraci napětíové závislosti rychlosti creepové deformace slitin E110G2 a E110ETE v bilogarithmickém znázornění byly na obr. 3, s ohledem na široký rozsah napětí a teplot, použity normované hodnoty minimální rychlosti creepu relevantním difúzním koeficientem  $D$  a hodnoty aplikovaného napětí, normovaného Youngovým modulem pružnosti  $E$  ( $b$  je Burgerův vektor). Z obr. 3 je patrné, že napětíová závislost je nelineární a proložené závislosti normované rychlosti creepu člení zvolený interval aplikovaného napětí na tři oblasti, ve kterých působí rozdílné mechanismy deformace a pro které hodnota napětíového exponentu  $n$  se výrazně mění. Z technických důvodů mohly být creepové zkoušky provedeny při napětích  $\sigma \geq 5$  MPa. Na základě stanovených hodnot exponentu  $n$  byly zkoušky provedeny ve třech oblastech

creepu s rozdílnými řídicími mechanismy creepu. Tento poznatek je žádoucí při volbě příslušné konstitutivní rovnice pro predikci creepového chování a creepové životnosti dané slitiny.



Obr. 3. Závislost normované minimální rychlosti creepu pro slitinu na normovaném napětí: (a) E110G2 a (b) E110ETE [8]

### Creepové zkoušky povlakových trubek za použití techniky helikoidních vzorků

Měření creepových deformací materiálů technikou helikoidních vzorků umožňuje stanovení creepových vlastností povlakových trubek jaderného paliva za podmínek, při kterých creepová deformace probíhá velmi pomalu, takže není standardními metodami creepových zkoušek měřitelná [6, 7]. Jestliže se mezní rychlosti měření creepové deformace u standardních zkoušek pohybují kolem  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$ , v případě techniky helikoidních vzorků jde o rychlosti zhruba o tři řády nižší, které se více blíží reálným rychlostem creepové deformace v reaktorovém provozu. Znalost creepového chování povlakových trubek za použití techniky helikoidních vzorků umožňuje lépe analyzovat iniciační stadium plastické nestability v počáteční fázi havárie reaktoru (např. LOCA havárie) a vyhodnotit nebezpečí nežádoucí deformace palivových tyčí při jejich dlouhodobém skladování mimo reaktor (bazény výměny a skladování paliva).

Technika helikoidních vzorků využívá obrácený princip mechanické pružiny, při kterém je velké posunutí spojeno s malou deformací pod mezí kluzu zkoušeného materiálu [10]. Vzorek stejného tvaru pak vykazuje snadno měřitelné posunutí v důsledku i velmi malých creepových deformací. Přehled technik používaných pro měření velmi malých deformací včetně podrobného popisu vyhodnocení získaných výsledků je lze nalézt v práci Kloce a Marečka [7].

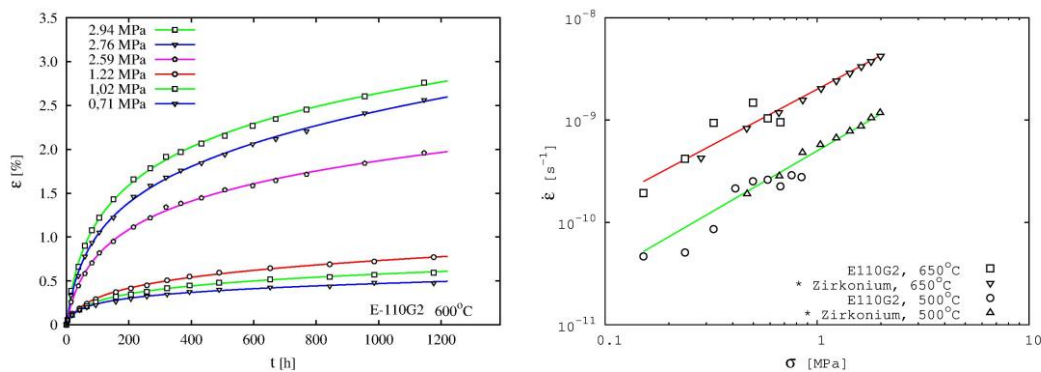
Pro výrobu helikoidních vzorků z tenkostěnných povlakových trubek bylo v Ústavu fyziky materiálů AV ČR navrženo a vyrobeno speciální zařízení, umožňující prořezání trubky podél šroubovice abrazivním dělicím kotoučem [10]. Rozložení napětí a deformace šroubové pružiny náleží ke klasickým úlohám pružnosti a pevnosti a řešení je proto již dávno známé [11]. Lze ukázat, že napětí v průřezu helikoidního vzorku je kombinací krutu, ohybu a čistého smyku, přičemž zkрут je dominantní tím více, čím větší je poměr průměru šroubovice k průřezu "vinutí" a ke stoupání závitů. Pro jednoduchost vyhodnocení se proto preferuje taková geometrie vzorku, aby tento poměr byl co největší, a bylo tedy možno počítat s čistým krutem pouze s malou korekcí na další minoritní režimy zatížení.



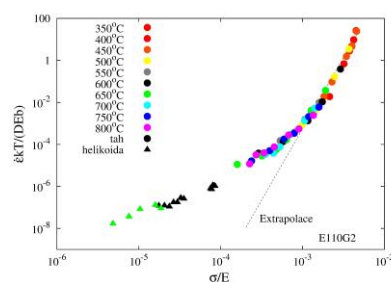
Obr. 4. Creepový vzorek helikoidního tvaru pro zkoušky povlakových trubek

Technika helikoidních vzorků vyžaduje provádění relativně dlouhodobých testů pro měření velmi malých rychlostí deformace. Při větších rychlostech, které by mohly umožňovat krátkodobé zkoušky, je vhodné použít standardní creepové zkoušky. Aby bylo možno srovnávat výsledky techniky helikoidních vzorků s výsledky standardních creepových zkoušek v tahu, převádí se smykové hodnoty napětí a deformace na ekvivalentní tahové hodnoty napětí  $\sigma$  a  $\varepsilon$  s využitím von Misesova kritéria (obr. 5).

Protože není dosud známá alternativní technika měření velmi pomalých deformací, je však možné provést nepřímé srovnání s výsledky standardních creepových zkoušek v tahu, zejména realizovaných při relativně nízkých hodnotách aplikovaného napětí - obr. 6. Hodnoty rychlosti creepové deformace jsou opět normalizovány pro kompenzaci teplotní závislosti. Z obrázku je zřejmé, že hodnoty rychlostí získané technikou helikoidních vzorků jsou komplementární s výsledky standardních zkoušek. Zároveň je nutné uvést, že v oblasti měření rychlostí pomocí helikoidních vzorků vykazuje napěťový exponent hodnotu blízkou  $n \sim 1$ , což svědčí o dominanci difúzních deformačních procesů (obr. 5b a obr. 6). Naznačená extrapolace dat z výsledků standardních krátkodobých zkoušek provedených z oblasti mocninového dislokačního creepu v obr. 6 demonstruje kritické podhodnocení hodnot rychlostí v oblasti dominantního působení difúzních deformačních procesů (nízké hodnoty exponentu  $n$ ), které lze očekávat v reálné praxi.



Obr. 5. Příklady výsledků creepových zkoušek získaných technikou helikoidních vzorků slitiny E110G2: (a) creepové křivky při teplotě 600 °C a aplikovaných napětí pod 3 MPa [10], (b) napěťová závislost rychlosti creepové deformace v sekundárním stadiu creepu slitiny E110G2 ve srovnání s čistým zirkoniem [11]





Obr. 6. Porovnání normovaných rychlostí creepu naměřených technikou helikoidních vzorků ( $\Delta$ ) s výsledky standardních zkoušek v tahu (o)

### Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TN02000018 NCK Strojírenství.

### Literatura

- [1] MURTY, K. L. *Materials ageing and degradation in light water reactors: Mechanism and management*. Oxford (UK): Woodhead Publishing Ltd., 2013. ISBN 978-0-85709-239-7.
- [2] YAGNIK, S. and GARDE, A. Zirconium alloys for LWR fuel cladding and core internals. In: *Structural alloys for nuclear energy applications*. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019, p. 247-291.
- [3] KASSNER, M. E. *Fundamentals of creep in metals and alloys*. Amsterdam: Elsevier, 2009, p. 1-295. ISBN 978-00804-7561-5.
- [4] ČADEK, J. *Creep in metallic materials*. Amsterdam: Elsevier, 1988, p. 1-372.
- [5] SKLENIČKA, V. and KLOC, L. Creep in boiler materials: mechanisms, measurement, and modelling. In: *Power plant management and performance improvement*. Oxford (UK): Woodhead Publishing Ltd., 2011, p. 180-221. ISBN:978-1-84569-6.
- [6] KLOC, L. - FIALA, J. - ČADEK, J. A new procedure to evaluate creep data obtained by the helicoid spring specimen technique under conditions of non-viscous creep behaviour. *Materials Science and Engineering*, 1990, A130, p. 61-65.
- [7] KLOC, L. - MAREČEK, P. Measurement of very low creep strains: A review. *Journal of Testing and Evaluations*, 2009, vol. 37, p. 53-58.
- [8] SKLENICKA, V. - KUCHAROVA, K. - KRAL, P. - DVORAK, J. - KVAPILOVA, M. - VRTILKOVA, V. - KREJCI, J. Investigation of the thermal creep behaviour of non-irradiated Zr1%Nb cladding alloys between 623 and 1223 K. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, vol. 583, paper 154518, doi: 10.1016 /j. nucmat.2023.154518
- [9] SKLENICKA, V. - KUCHAROVA, K. - KVAPILOVA, M. - KRAL, P. - DVORAK, J. The transition from the power-law to the power-law breakdown regimes in thermal of creep of Zr1%Nb cladding alloys. *Kovové Materiále*, 2021, vol. 59, no. 5, p. 279-289, doi:10.4149/km.2021.5.279.
- [10] KLOC, L. *Měření velmi pomalých creepových deformací materiálů pro pokrytí jaderného paliva technikou helikoidních vzorků*. Brno: ÚFM AV ČR, 2018, certifikovaná metodika – původní zpráva, certifikát TÜV NORD ev. č. 004/17.
- [11] WAHL, A. M. *Mechanical springs*. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [12] FIALA, J. - ČADEK, J. Creep in zirconium at low stresses and temperatures from 748 K to 973 K. *Materials Science and Engineering*, 1985, vol. 75, p. 117-126, doi: 10.1016/025-5416(85)90183-1

## DIFRAKČNÍ ANALÝZA ZIRKONIOVÝCH SLITIN PALIVOVÉHO POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA

### DIFFRACTION ANALYSIS OF ZIRCONIUM ALLOYS FOR NUCLEAR FUEL CLADDING

Karel Trojan <sup>a)</sup>, Věra Vrtílková <sup>b)</sup>, Jiří Čapek <sup>a)</sup>, Jakub Krejčí <sup>b)</sup> a Nikolaj Ganev <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra inženýrství pevných látek

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

#### Abstrakt

Předmětem je prezentace výsledků rentgenografického difrakčního výzkumu tepelného chování fázového složení a zbytkových napětí zirkoniových slitin Zr1Nb a ZrSnNb palivového pokrytí jaderného paliva od pokojové teploty až po 1600 °C. Byl analyzován stav pokrytí po simulaci provozu v korozním prostředí VVER za teploty 360 °C, kdy byl pozorován, v porovnání s pokojovou teplotou, pokles nepříznivých tahových zbytkových napětí samotného kovu a zároveň snížení tlakových zbytkových napětí oxidové vrstvy. Dále byl popsán průběh fázové transformace oxidové vrstvy (ZrO<sub>2</sub>) slitiny Zr1Nb, kde fázová transformace oxidové vrstvy má rozhodující vliv na kinetiku oxidace a absorpci vodíku při hypotetických haváriích tlakovodních reaktorů.

#### Abstract

The subject of this contribution is the presentation of the results of X-ray diffraction research of the thermal behaviour of phase composition and residual stresses of Zr1Nb and ZrSnNb zirconium alloys of nuclear fuel cladding from room temperature up to 1600 °C. The state of the cladding after simulated operation in the corrosive environment of the VVER reactor at 360 °C was analysed, where a decrease in the unfavourable tensile residual stresses of the metal itself was observed compared to room temperature and a simultaneous decrease in the compressive residual stresses of the oxide layer. Furthermore, the phase transformation of the oxide layer (ZrO<sub>2</sub>) of the Zr1Nb alloy was described, where the phase transformation of the oxide layer has a decisive influence on the oxidation kinetics and hydrogen absorption in hypothetical pressurized water reactor accidents.

#### Úvod

Současným trendem v jaderném průmyslu je zvyšování vyhoření paliva z důvodu snížení nákladů celého palivového cyklu, provozu a nakládání s vyhořelým palivem za současného zvýšení bezpečnosti. Při vysokém stupni vyhoření palivové pokrytí vykazuje výraznou degradaci jak z důvodu oxidace, tak absorpci vodíku, což výrazně ovlivňuje chování pokrytí při hypotetické těžké havárii [1].

Zbytková napětí jsou napětí, která existují v tuhém tělese, aniž by na něj působily další vnější síly. Rozlišujeme tzv. makroskopická napětí, která jsou ve velkých oblastech homogenní a dosahují rovnováhy v celém objemu tělesa. Přítomnost makroskopických zbytkových napětí lze pozorovat změnou tvaru materiálu po narušení napětíové rovnováhy vnějším zásahem [2]. Tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozní vlastnosti. Také zlepšují odolnost proti únavě, a naopak se snižují rychlost šíření trhlin, nebezpečí korozního praskání, náchylnost k mezikrystalové korozi apod. Tyto charakteristiky jsou velmi důležité pro hodnocení integrity palivového pokrytí během celého životního cyklu, a proto je zapotřebí popsat makroskopická zbytková napětí jak samotného kovu, tak oxidové vrstvy. Rentgenová difrakce na rozdíl od ostatních metod ze svého principu dokáže určit makroskopická zbytková

napětí pro každou krystalickou fázi zvlášť, proto má nezastupitelný význam v materiálovém výzkumu.

Fázová transformace monoklinického  $ZrO_2$  na tetragonální je doprovázena zmenšením objemu základní krystalické mřížky, což v určitém okamžiku způsobí popraskání oxidové vrstvy. Tomuto fenoménu je připisována změna kinetiky oxidace a absorpce vodíku při provozu i při hypotetických haváriích tlakovodních reaktorů [3]. Rentgenová difrakce, jak už bylo zmíněno, dokáže určit hmotnostní zastoupení jednotlivých krystalických fází, a tedy při zahřívání in-situ popsat kinetiku fázové transformace.

## Experiment

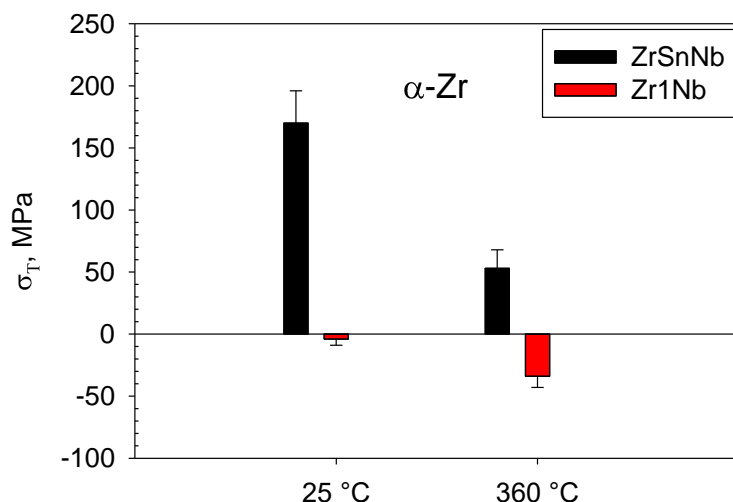
Difrakční experimenty pro určení zbytkových napětí byly provedeny na vnějším povrchu segmentů žíhaných trubek ze slitin Zr1Nb a ZrSnNb palivového pokrytí, které byly před samotnou analýzou exponovány 630 dnů v prostředí vody VVER při teplotě 360 °C a tlaku 18,6 MPa. Fázová transformace byla popsána na základě analýzy prášku slitiny Zr1Nb, který byl získán vysokoteplotní oxidací slitiny při teplotě 1460 °C.

Difrakční měření pro určení makroskopických zbytkových napětí bylo realizováno na difraktometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical s rentgenkami s kobaltovou a chromovou anodou. V tangenciálním směru palivového pokrytí (T). Byly analyzovány difrakční linie  $\{105\}$  fáze  $\alpha$ -Zr a  $\{-104\}$  monoklinické fáze m-ZrO<sub>2</sub>. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí  $2\theta(\sin^2\psi)$  za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti ( $\theta$  je difrakční úhel,  $\psi$  – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel byl určen z maxima difrakční linie  $K\alpha_1\alpha_2$  mřížkových rovin aproximovaného funkcí Pearson VII. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty  $\frac{1}{2}s_2 = 14,26 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $s_1 = -3,62 \text{ TPa}^{-1}$  pro  $\alpha$ -Zr a  $\frac{1}{2}s_2 = 6,28 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $s_1 = -1,45 \text{ TPa}^{-1}$  pro m-ZrO<sub>2</sub>. Což odpovídá makroskopického modulu elasticity  $E = 207 \text{ GPa}$  a Poissonově konstantě  $\nu = 0,3$  pro m-ZrO<sub>2</sub> a  $E = 94 \text{ GPa}$  a  $\nu = 0,34$  pro  $\alpha$ -Zr. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou  $\sin^2\psi$  [2].

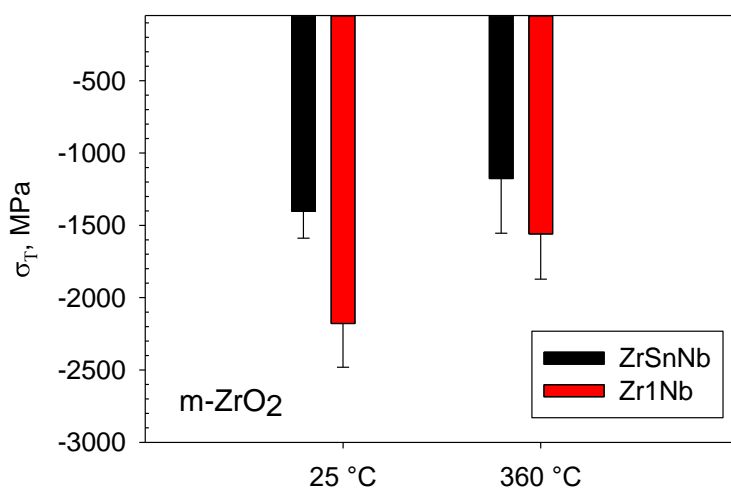
Difrakční měření pro analýzu fázového složení bylo provedeno na  $\theta$ - $\theta$  goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical za pokojové i zvýšené teploty až 1600 °C v teplotní komoře HTK 2000N firmy Anton Paar. Teplotní komora pro určení teploty využívá termočlánek typu S, pro větší vzorky byla provedena kalibrace teploty na základě teplotní roztažnosti standardu. Pro určení fázového složení povrchových vrstev, byly získány difrakční záznamy v klasické Braggově-Brentanově konfiguraci s kobaltovým zářením. Naměřené difrakční diagramy byly zpracovány programem X'Pert HighScore Plus a krystalické fáze byly identifikovány pomocí databáze PDF-2. Kvantitativní analýza byla vyhodnocena pomocí Rietveldovy analýzy v softwaru MStruct. Efektivní hloubka vnikání byla v tom případě ca 10  $\mu\text{m}$ .

## Výsledky a diskuze

Hodnoty makroskopických zbytkových napětí kovu  $\alpha$ -Zr a m-ZrO<sub>2</sub> získaných jak za pokojové teploty, tak za teploty 360 °C z jednotlivých vzorků jsou uvedeny na obr. 1 a obr. 2. Na základě výsledků lze tvrdit, že u kovu dochází zahřátím na teplotu 360 °C ke snížení hodnot makroskopických zbytkových napětí, kdy pro slitinu ZrSnNb byla zjištěna nepříznivá tahová napětí a pro slitinu Zr1Nb pouze tlaková. Vysoká tlaková zbytková napětí monoklinického oxidu, viz obr. 2, výrazně klesla při teplotě 360 °C v porovnání s pokojovou teplotou pouze u vzorku Zr1Nb. Dále je zajímavé, že hodnoty tlakových zbytkových napětí monoklinického oxidu při zvýšené teplotě vykazují menší rozptyl v porovnání s analýzou za pokojové teploty.

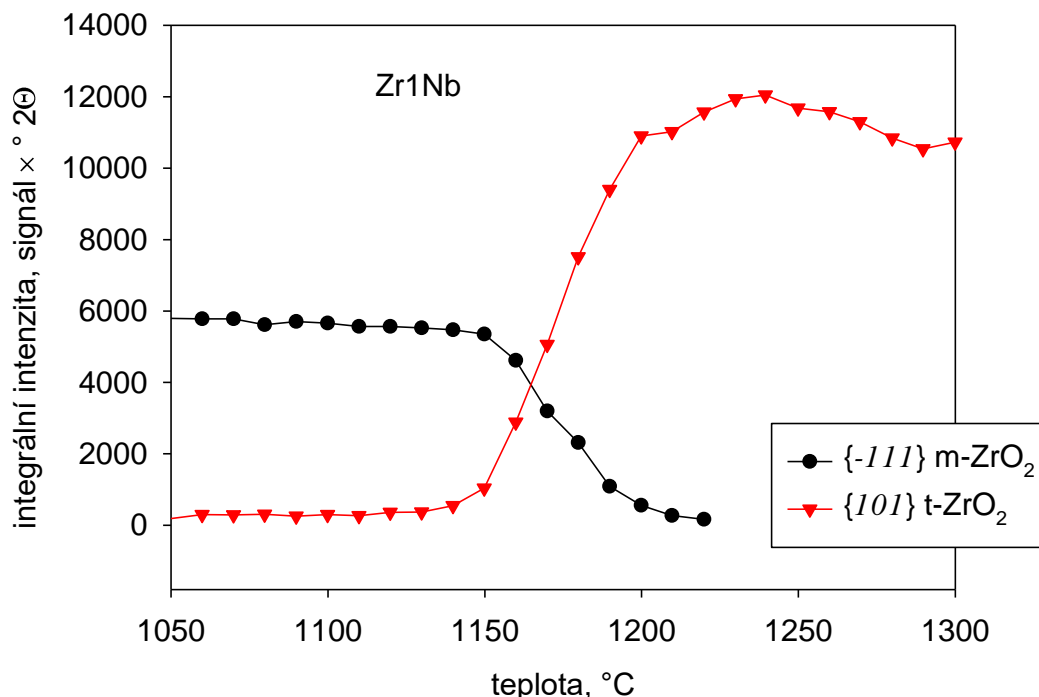


Obr. 1: Porovnání hodnot makroskopických zbytkových napětí  $\alpha$ -Zr



Obr. 2: Porovnání hodnot makroskopických zbytkových napětí m-ZrO<sub>2</sub>

Prášky Zr slitin byly zahřívány v teplotní komoře do teploty 1600 °C, kdy byla pozorována dvě difrakční maxima  $\{-111\}$  monoklinického (m-ZrO<sub>2</sub>) a  $\{101\}$  tetragonálního (t-ZrO<sub>2</sub>) oxidu, kdy průměrná rychlost ohřevu okolo pozorovaného fázového přechodu byla ca 0,08 °C/s. Integrální intenzity daného maxima jsou uvedeny na obr. 3, kdy obecně lze říci, že s rostoucí intenzitou roste i podíl dané fáze. Je možné tedy vyslovit závěr, že fázová transformace monoklinického oxidu na tetragonální při dané průměrné rychlosti ohřevu neprobíhá skokově, ale v teplotním rozsahu ca 1100 až 1200 °C. Je také dále možné pozorovat, že integrální intenzita t-ZrO<sub>2</sub> pro slitinu Zr1Nb je přibližně konstantní od pokojové teploty až do teploty 1110 °C, při této teplotě se začíná měnit směrnice proložené přímkou.



Obr. 3: Porovnání integrálních intenzit vzorku Zr1Nb

### Závěr

Z výsledků je možné konstatovat, že pro slitinu ZrSnNb byla zjištěna nepříznivá tahová napětí a pro slitinu Zr1Nb pouze tlaková. Lze také vyslovit závěr, že u kovu dochází v povrchové vrstvě zahřátím na teplotu 360 °C ke snížení hodnot makroskopických zbytkových napětí a u monoklinického oxidu ke snížení tlakových napětí. Fázová transformace monoklinického oxidu na tetragonální při dané průměrné rychlosti ohřevu 0,08 °C/s neprobíhá skokově, ale v teplotním rozsahu ca 1100 až 1200 °C.

Bylo ukázáno, že rentgenová difrakce dokáže in-situ určit hmotnostní zastoupení krystalických fází a popsat makroskopická zbytková napětí, tudíž má nezastupitelný význam v materiálovém výzkumu.

### Poděkování

Práce byla provedena za podpory ČEZ a.s. a dále podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS22/183/OHK4/3T/14.

### Literatura

- [1] JEONG, Yong Hwan, et al. Out-of-pile and in-pile performance of advanced zirconium alloys (HANA) for high burn-up fuel. *Journal of nuclear science and technology*, 2006, vol. 43, no. 9, p. 977-983.
- [2] KRAUS, Ivo a GANEV, Nikolaj. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.
- [3] BAEK, Jong Hyuk - PARK, Ki Bum - JEONG, Yong Hwan. Oxidation kinetics of Zircaloy-4 and Zr-1Nb-1Sn-0.1 Fe at temperatures of 700–1200 C. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, vol. 335, no. 3, p. 443-456.



## LABORATORNÍ HODNOCENÍ PROVOZNÍ DEGRADACE POTRUBÍ SE SVARY TVD EDU 2

### EVALUATION OF THE OPERATIONAL DEGRADATION OF TVD EDU 2 PIPELINE WELDS

Zuzana Vávrovcová, Miroslav Krpec, Zbyněk Veselka, Petr Brabec a Petr Vlček

ÚJV Řež, a. s.

#### Abstrakt

Příspěvek shrnuje výsledky nedestruktivního (radiografie a CT tomografie) a destruktivního (LOM, SEM) hodnocení provozní degradace svarových spojů potrubí TVD JE Dukovany. Ve svarech byl zadavatelem předpokládán nález poškození účinky mikrobiální koroze způsobené mangan oxidujícími mikroorganismy. Na vnitřním povrchu potrubí byl laboratorním hodnocením potvrzen výskyt poměrně rozměrných korozních kavern, které se nacházely zejména pod povrchem. Pomocí SEM byl na vnitřním povrchu u jedné z dutin potvrzen nález  $MnO_2$  globulí, který nasvědčuje uvažovanému mechanismu koroze mangan oxidujícími mikroorganismy.

#### Abstract

The paper summarizes the results of non-destructive (radiography and CT tomography) and destructive (LOM, SEM) evaluation of the operational degradation of welded joints of ESW pipelines of the Dukovany NPP. Microbial corrosion caused by manganese-oxidizing microorganisms was assumed as a potential degradation mechanism. On the inner surface of the pipe, the laboratory evaluation confirmed the occurrence of relatively large corrosion caverns, which were mainly located below the surface. Using SEM, the finding of  $MnO_2$  globules on the inner surface of one of the cavities was confirmed, which suggests the considered mechanism of manganese-oxidizing microorganisms' corrosion.

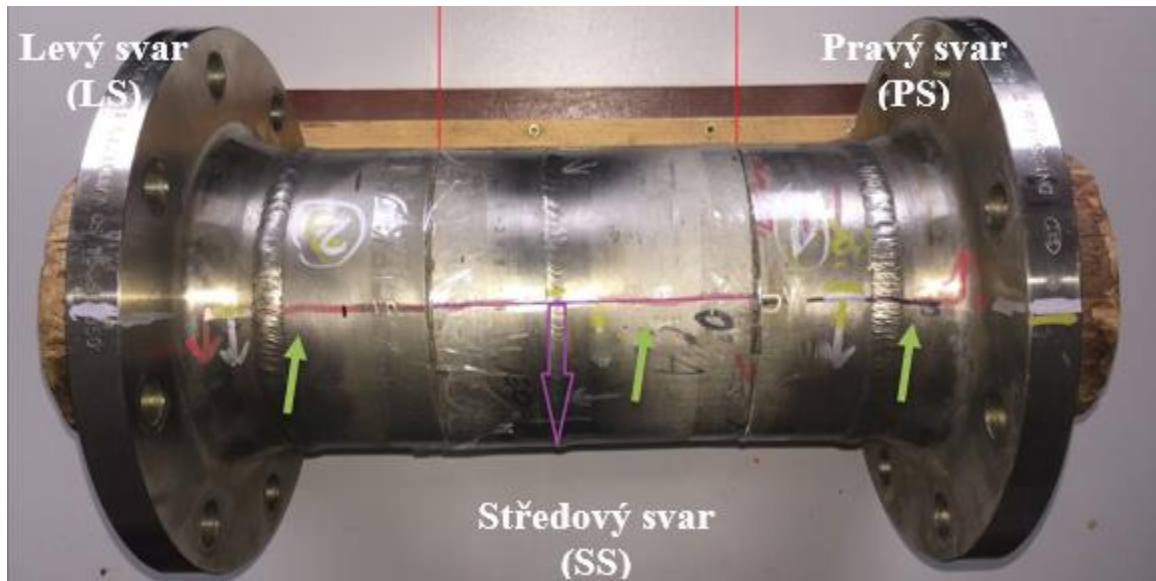
#### Úvod

Do oddělení Podpora provozu energetických zařízení ÚJV Řež, a. s. byly předány celkem 3 vzorky potrubí DN 125 se svarovými spoji a přírubami, které ukazuje obr. 1. Červené čáry na snímku značí rozdělení na části. Jednotlivé části byly označeny jako „levý svar (LS)“, „středový svar (SS)“ a „pravý svar (PS)“. Deklarované složení základního materiálu přírub a potrubí je titanem stabilizovaná austenitická ocel 1.4571 (ekvivalent 316Ti), viz tabulka 1. Potrubní systém byl provozován s médiem o tlaku 0,6 MPa při teplotě 30 °C. Médium v podobě vodného roztoku bez  $H_3BO_3$  potrubím proudí 10–11 měsíců v roce, po zbytek času zde voda stojí nebo je vypuštěná. Potrubí pochází z druhého bloku jaderné elektrárny Dukovany (EDU). Potrubí bylo v provozu od roku 2008, kdy byl materiál potrubí z uhlíkové oceli DN200 nahrazen austenitickou ocelí z důvodu rozsáhlé plošné koroze.

Tab. 1: Předepsané chemické složení materiálu potrubí dle normy ČSN EN 10088-3 [hm. %]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti
1.4571	0,08	1	2	0,045	0,03	16,5-18,5	2-2,5	10,5-13,5	5xC až 0,7

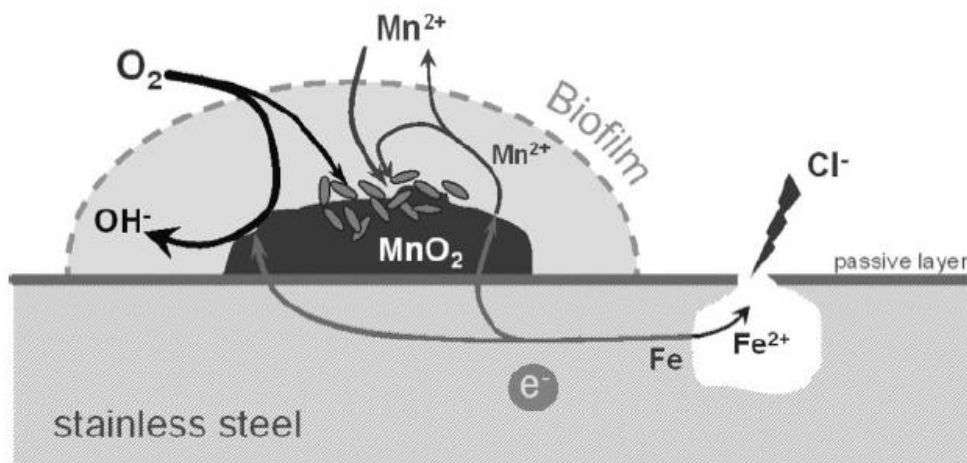
Cílem prací bylo provedení laboratorního hodnocení provozní degradace potrubí technické vody důležité (TVD) způsobené účinkem korozních jevů, projevujících se vznikem kavern v důsledku působení mikrobiální koroze.



Obr. 1: Vzorok dodané do ÚJV Řež, a. s. Zelená šipka značí výchozí (nulový) orientační bod.

Mikrobiální koroze byla dříve připisována především bakteriím redukujícím sírany, ale v poslední době se ukazuje, že může být způsobena také metabolickou aktivitou několika typů mikroorganismů, běžně se vyskytujících ve vodě [1-4]. Tyto organismy se nazývají „mikroorganismy oxidující mangan“ (manganese oxidizing microorganisms – zkráceně MOMO's). Za vhodných (aerobních) podmínek, kdy jsou ve vodném prostředí přítomny ionty manganu, mají MOMO tendenci ionty oxidovat na oxidy manganu (III/IV) nebo hydroxidy [1, 2]. Tyto sloučeniny nejsou stechiometrické a většinou se jedná o amorfni fáze [1-3], což znesnadňuje jejich identifikaci pomocí rentgenové difrakce [1, 2]. Pro zjednodušení se tyto sloučeniny stechiometricky idealizují na vzorce  $MnO_2$  a  $MnOOH$  [1, 3].  $MnO_2$  je dobře znám jako elektrochemicky vysoce reaktivní, silný oxidant [1, 3]. Výše popsané se děje v biotickém kroku koroze. Průběh koroze je schematicky znázorněn na obr. 2. Úsady vznikající aktivitou mikroorganismů jsou deponovány na povrch nerezavějící oceli a samotná koroze dále probíhá v abiotickém kroku a je založená na elektrochemických vlastnostech oxidů  $MnO_2$ . V důsledku toho dojde k posunu volného korozního potenciálu pasivní nerezové oceli v anodickém směru, což snižuje kritickou koncentraci chloridů pro iniciaci bodové koroze (pitting) [1-3]. Nejnižší zaznamenaná koncentrace chloridů, kdy dojde k takovému poškození je 65 mg/l. Materiál se za současného působení  $MnO_2$  neumí repasivovat [1, 3]. MIC je v tomto případě rychlejší.

Mikrobiální koroze pomocí MOMO byla pozorována ve sladkovodních prostředích. Mohou jí podléhat martenzitické a zejména austenitické oceli. Austenitické oceli (jako např. 1.4571) jsou pro tento typ koroze náchylné. Na vnitřním povrchu postiženého potrubí bývá pozorován černý slizký film, který obsahuje vysoké množství  $MnO_2$ , a také silná vrstva úsad biomineralizovaného Mn (IV) oxidu.



Obr. 2: Schéma mechanismu mikrobiální koroze MOMO

### Metodika

Na dodaných vzorcích bylo nejdříve provedeno nedestruktivní hodnocení, které se skládalo z detailní vizuální a kapilární zkoušky. Následně byly původní vzorky rozměrově redukovány na výřezy kroužků (prstenců) s obvodovým svarem a ty byly poslány do firmy Gamalux Plzeň, spol. s r.o. pro radiografické hodnocení svarových spojů. Na základě výsledků byly vybrány a vyřezány z kroužků vzorky s indikacemi, které byly poslány do firmy Ceitec, kde byly CT tomografií detailně zdokumentovány vady ve vzorcích, zejména pak kaverny způsobené mikrobiální korozi (MIC).

Na základě těchto výsledků byly vytipována místa hodnocení vnitřního povrchu pomocí SEM a destruktivních hodnocení na podélných řezech pomocí LOM a SEM.

V neposlední řadě bylo ověřeno chemické složení pomocí XRF analyzátoru.

### Výsledky

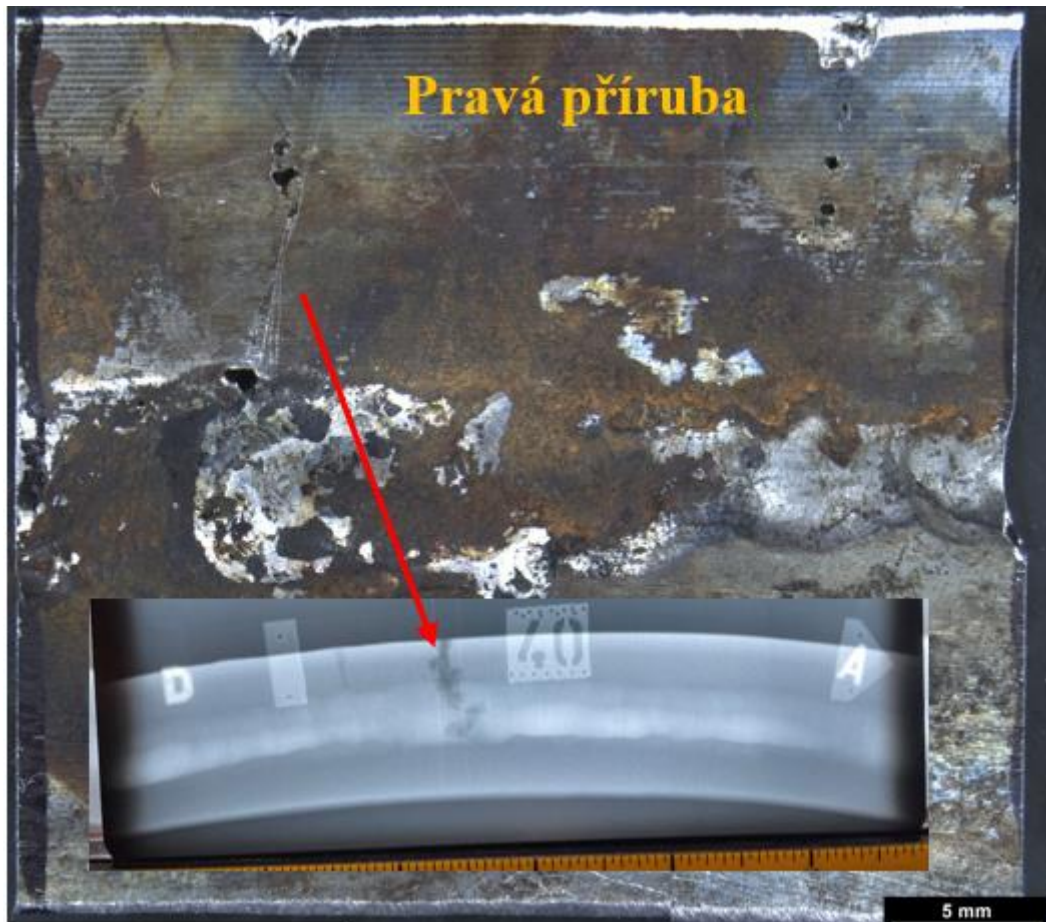
#### Chemické složení a mikrostruktura materiálu

Chemické složení přírub a potrubí ověřené metodou XRF vyhovuje deklarované titanem stabilizované austenitické oceli 1.4571.

Mikrostruktura všech částí je austenitická s výskytem typického dvojčatění a s delta feritem. Mikrostruktura svarového kovu je také austenitická, převážně dendritická, typu FA.

#### Vizuální a kapilární kontrola

Vizuální i kapilární kontrola potvrdila, že vnější povrch je bez známek provozního poškození. Na vnějším i vnitřním povrchu byly hodnoceny výrobní vady svarového spoje, nejčastěji se objevovaly vady typu studený spoj, neprovařený kořen, přetečení apod. Vnitřní povrch všech vzorků byl pokryt šedočernými úsadami, což by mohlo naznačovat předchozí výskyt slizkého biofilmu s oxidy MnO<sub>2</sub> [1-4], nicméně očekávané mocné vrstvy korozních produktů, kde by dominantní složkou byl MnO<sub>2</sub>, zde díky zřetelným stopám po mechanickém čištění zachovány nebyly. Na několika oblastech vnitřního povrchu byly pozorovány hnědo – oranžové korozní mapy. U vzorku s „pravým“ svarem byly v blízkosti těchto korozních map pozorovány dutiny, obr. 3.



Obr. 3: Detail vnitřního povrchu pravého svaru s dutinami, vzorek PS2 s radiografickým snímkem vnějšího povrchu

#### **Radiografická kontrola svarových spojů**

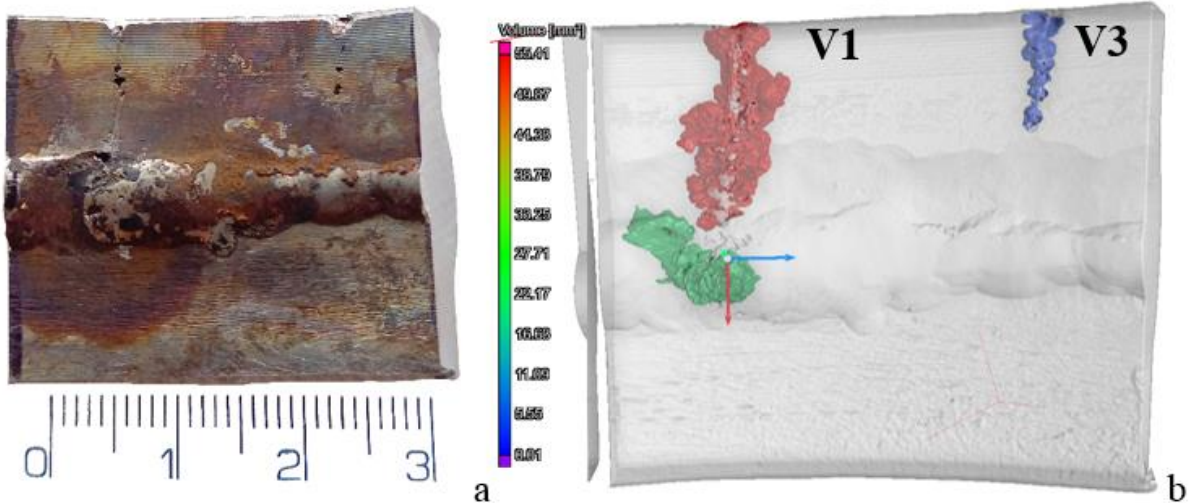
Radiografická kontrola všech svarových spojů potvrdila výskyt běžných výrobních vad svarových spojů, které vznikly již při svařování, a nejedná se o provozní vady. Naopak v místech výskytu hnědo-oranžových „korozních map“ byla prokázána přítomnost dutin, které odpovídají kavernám vzniklým mikrobiální korozí, např. obr. 3.

Na základě výstupů z radiografie bylo vytypováno několik míst, které byly podrobeny bližšímu zkoumání pomocí CT tomografie.

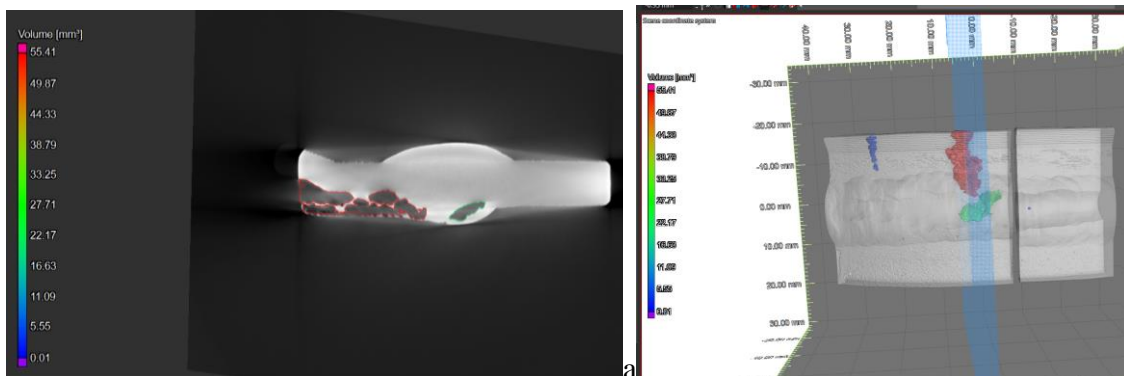
#### **CT tomografie, LOM**

CT tomografie vybraných vzorků potvrdila výstupy z vizuální kontroly, a to, že v místech výskytu korozních map na všech svarových spojích byly nalezeny velké kaverny, které se nachází převážně pod povrchem a s vnitřním povrchem komunikují pouze na několika málo místech. Nejdelší kaverna, která byla nalezena na vzorku s „pravým“ svarem ve vzdálenosti ~130 mm od nulového bodu, byla nalezena v základním materiálu pravé příruba a měřila cca 3,2 cm. V tomto případě byly i pouhým okem viditelné dutiny na vnitřním povrchu, obr. 3 a obr. 4. Na obr. 5 je pro představu vyobrazen tomografický řez vzorkem v maximálním předpokládaném rozměru vady V1. Přibližně v tomto místě byl proveden i metalografický řez a skutečný vzhled vady je zobrazen na obr. 6. Všechny detekované kaverny byly pozorovány jak ve svarovém kovu či v jeho blízkosti, ale také v základním materiálu či jeho TOZ. Všechny kaverny iniciují na vnitřním povrchu, jsou bez korozní výplně a mají obdobný charakter – uvnitř dutiny ve svarovém kovu byly pozorovány zbytky dendritických „stroměčků“ a v základním materiálu byly vidět lamelky materiálu, které nepodlehly korozi. Koroze se nešíří po hranicích zrn, zrna koroďují celá.

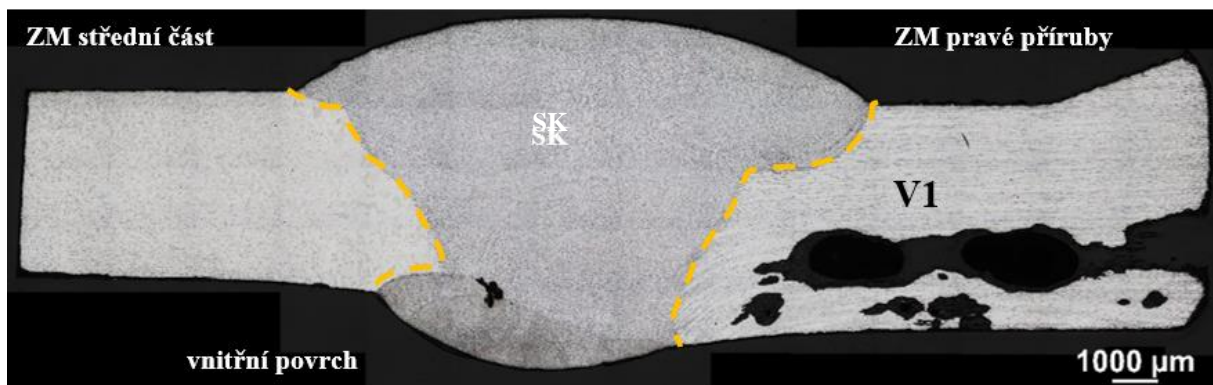




Obr. 4: Vnitřní povrch vzorku PS-2 (a) a jeho zobrazení pomocí CT tomografie (b)



Obr. 5: Řez „červenou“ a „zelenou“ vadou cca v max. rozměru V1

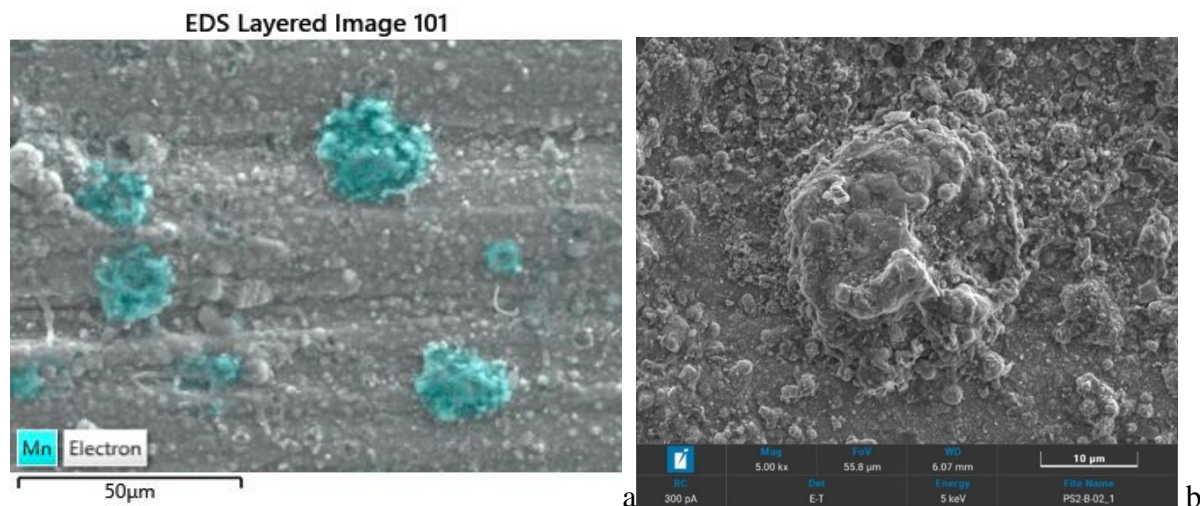


Obr. 6: Podélný řez vadou V1

### SEM vnitřního povrchu

Vnitřní povrch potrubí byl pokryt šedo-černými či šedo-hnědými úsadami, což by mohlo nasvědčovat původní přítomnosti černého slizkého biofilmu [1-3], který by byl patrný po vyřezání vzorků ze sestavy TVD. Vzhledem k tomu, že byl povrch k dispozici ke studiu až po mechanickém očištění, bylo velmi obtížné prokázat přítomnost globulí MnO<sub>2</sub>, které by potvrzovaly uvažovaný mechanismus koroze Mn oxidujícími mikroorganismy. Globule byly po důkladné inspekci oblastí potvrzeny v blízkosti vady V1, viz obr. 7. Jejich přítomnost nasvědčuje uvažovanému mechanismu mikrobiální koroze mangan-oxidujícími mikroorganismy (MOMO).





Obr. 7: MnO<sub>2</sub> globule. RTG mapy prvkového složení SEM-EDS (a), režim SE (in-beam detector) (b), vzorek PS-2-B

### Závěry

Za účelem hodnocení provozní degradace potrubí se svary TVD EDU 2 byly do odd. Podpora provozu energetických zařízení dodány celkem 3 vzorky potrubí DN 125 se svarovými spoji. Vzorky byly vyřezány z potrubí, které bylo v provozu mezi lety 2008–2021. Předpokládaným mechanismem poškození posuzovaných vzorků byla mikrobiální koroze (MIC), přičemž byla uvažována souvislost s přítomností mangan oxidujících mikroorganismů (MOMO).

Vzorky byly nejdříve podrobeny nedestruktivním kontrolám pomocí vizuální a kapilární metody, dále pak zobrazovací radiografické metody a vybrané vady také CT tomografií. Na vybraných vzorcích byl hodnocen stav vnitřního povrchu. Ve vytipovaných místech byly provedeny příčné řezy svarovými spoji, byly připraveny metalografické výbrusy pro hodnocení pomocí LOM a SEM. V neposlední řadě bylo ověřeno chemické složení materiálů pomocí metody XRF.

Výsledky dosažené v rámci nedestruktivního i destruktivního hodnocení lze shrnout do následujících bodů:

- Chemické složení přírub a potrubí ověřené metodou XRF vyhovuje deklarované titaniem stabilizované austenitické oceli 1.4571 (ekvivalent 316Ti).
- Mikrostruktura všech částí je austenitická s výskytem typického dvojčatění a s různým obsahem delta feritu. Mikrostruktura svarového kovu je také austenitická, převážně dendritická typu FA.
- Vizuální i kapilární kontrola prokázala, že vnější povrch je beze známek provozního poškození.
- Vnitřní povrch všech vzorků potrubí byl pokryt šedočernými úsadami, což by mohlo naznačovat předchozí výskyt slizkého biofilmu s oxidy MnO<sub>2</sub> [1-4], nicméně vnitřní povrch vzorků byl před dodáním mechanicky očištěn, tudíž se zde nenacházely odpočívající mocné vrstvy korozních produktů.
- Radiografická metoda a CT tomografie vybraných vzorků potvrdila výstupy z vizuální kontroly, a to, že v místech výskytu korozních map na všech svarových spojkách byly nalezeny velké kaverny, které se nachází převážně pod povrchem a s vnitřním povrchem komunikují pouze na několika málo místech.
- Nejrozsáhlejší (nejdelší) kaverna, která měřila cca 3,2 cm, byla nalezena v ZM na vzorku s pravým svarem, v místech, kde byly dutiny patrné pouhým okem. Ostatní nalezené kaverny byly přítomné jak v ZM, případně TOZ, tak i ve SK. Dutiny iniciují na vnitřním povrchu, nejsou vyplněny korozními úsadami a mají obdobný charakter.

- Vzhledem k mechanickému očištění potrubí před dodáním do laboratoře bylo velmi obtížné nalézt indicie, které by umožnily specifikovat degradační mechanismus postihující posuzovanou část provozovaného potrubí TVD. Důkladnou mikroskopickou inspekci byly v černých tečkách zjištěných v blízkosti korozní kaverny na vnitřním povrchu potrubí identifikovány globule MnO<sub>2</sub>, nasvědčující korozi mangan oxidujícími mikroorganismy – MOMO.

Problematikou lokalizované koroze se dlouhodobě věnují útvary Systémy primárního okruhu, Chemické režimy, Péče o zařízení a Řízení stárnutí EDU i ETE. Zde citovaná analýza je jedním z dílčích řešení shora uvedených útvarů.

### Literatura

- [1] VÁVROVCOVÁ, Zuzana, KRPEC Miroslav, VESELKA Zbyněk, BRABEC, Petr a VLČEK, Petr. *Laboratorní hodnocení provozní degradace potrubí se svary TVD EDU 2*. Řež, ÚJV Řež, a. s., 2022, technická zpráva.
- [2] LINHARDT, Paul. Twenty years of experience with corrosion failures caused by manganese oxidizing microorganisms. *Materials and Corrosion*. 2010, vol. 61, no. 1, p. 1034-1039. ISSN 09475117. doi:10.1002/maco.201005769Linhardt 2004
- [3] LINHARDT, Paul. Microbially influenced corrosion of stainless steel by manganese oxidizing microorganisms. *Materials and Corrosion*. 2004, vol. 55, no. 3, p. 158-163. ISSN 09475117. doi:10.1002/maco.200303782
- [4] *The Role of Manganese Dioxide (MnO<sub>2</sub>) Deposition in Microbiologically Influenced Corrosion*. 2004, Palo Alto, CA: EPRI: 1009597.



## LABORATORNÍ EXPOZIČNÍ SMYČKA S VNITŘNÍM PŘETLAKEM A KOROZNÍM ZÁSYPEM

### LABORATORY EXPOSURE LOOP WITH INTERNAL OVER-PRESSURE, COVERED WITH CORROSION ASH

Marie Ohanková <sup>a)</sup>, Lucie Pilsová <sup>a, b)</sup>, Irena Andršová <sup>a)</sup>, Tomáš Chmela <sup>a)</sup> a Josef Čmakal <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha 5 – Zbraslav

<sup>b)</sup> Ústav materiálového inženýrství FS ČVUT v Praze, Karlovo náměstí 13, Praha 2 – Nové Město

#### Abstrakt

Příspěvek se zabývá návrhem, realizací a prvními výsledky získanými pomocí laboratorní expoziční smyčky. Jedná se o zařízení pro přípravu degradovaného materiálu, které vyvolává degradaci současným působením teploty, korozního prostředí a napětí způsobeného vnitřním přetlakem vyvozeným tlakem páry v definovaném uzavřeném vnitřním objemu. Smyčka je složená z trubkových ohybů a obvodových svarů, což umožňuje současné hodnocení několika typů materiálů, jejich ohybů a svarových spojů (včetně heterogenních) za shodných podmínek zatěžování.

#### Abstract

The paper deals with the design, implementation and first results obtained using a laboratory exposure loop. It is a device for the preparation of degraded material, which causes degradation by the simultaneous action of temperature, corrosive environment and stress induced by internal overpressure derived from steam pressure in a defined closed internal volume. The loop is composed of pipe bends and circumferential welds, which enables the simultaneous evaluation of several types of materials, their bends and weld joints (including heterogeneous ones) under identical loading conditions.

#### Úvod

Pro získání materiálových dat nutných například pro stanovování zbytkové životnosti je potřeba vyrábět zkušební tělesa z degradovaného materiálu. V případě, že:

- není k dispozici provozně degradovaný vzorek materiálu,
- náklady spojené s vyříznutím tohoto vzorku z tlakového systému jsou neúměrně vysoké,
- možnost vzniku neopravitelného poškození tlakového systému je příliš vysoká,

je nutné si degradovaný materiál pro potřeby zkoušek vyrobit. Přičemž jak působící teplota, resp. korozní prostředí, tak i napjatost v něm by se měla co nejvíce blížit skutečnému provozu. A protože velká část tlakových zařízení je namáhána vnitřním přetlakem, je i zařízení *Laboratorní expoziční smyčka* tohoto typu.

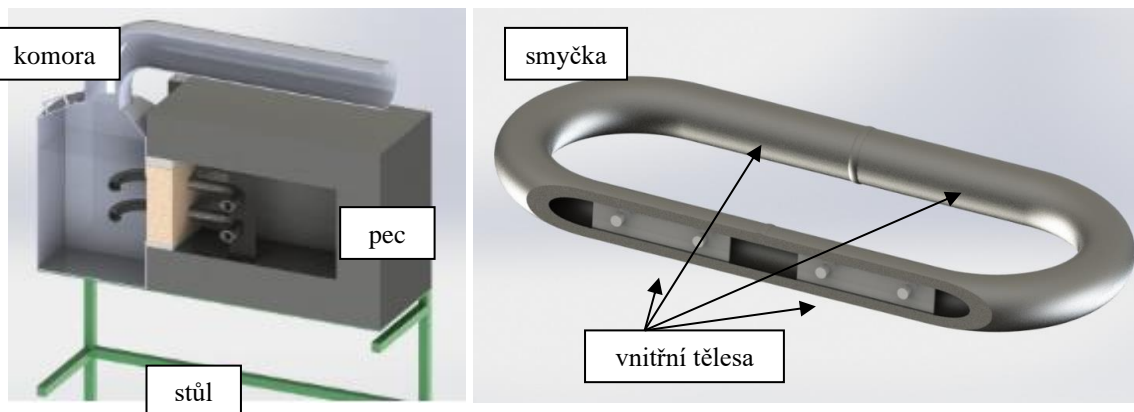
Laboratorní expoziční smyčka je tedy zařízení pro přípravu degradovaného materiálu. Tato degradace je způsobena současným působením teploty, korozního prostředí a napětí. Přičemž:

- teplota je vyvolána zasunutím smyčky do odporové laboratorní pece,
- koroze je vyvolána jednak:
  - na vnějším povrchu smyčky z části okolním vzduchem a z části korozním zásypem,
  - na vnitřním povrchu vodní párou,
- napětí je vyvolané vnitřním přetlakem vyvozeným tlakem vodní páry v definovaném uzavřeném vnitřním objemu.

Šest obvodových svarů na jedné smyčce přitom dává možnost současného hodnocení několika materiálů, několika typů svarových spojů (včetně heterogenních) za shodných podmínek zatěžování.

### Návrh expoziční smyčky

Zařízení pro laboratorní expozici bylo připravováno jako dvoukomorové, viz 1. První komora slouží k vytvoření, pokud možno homogenního, teplotního pole na vzduchu (označeno *pec*). Prostředí vzduchu zcela postačuje požadavkům na expoziční kanál, protože případný benefit vytvoření komory s definovanou atmosférou (směsí plynů) by byl v porovnání s nutnými vloženými náklady neúměrně malý. Druhá komora modeluje korozní prostředí v sytkém zá-sypu (označeno *komora*). Obě komory jsou propojeny zkušebním tělesem (označeno *smyčka*). Toto zkušební těleso bylo uvažováno jako kombinované. Základ tvoří uzavřený trubkový okruh, ve kterém by měla proudit přehřátá pára. Do vnitřního prostoru trubek *smyčky* byly vloženy vnitřní vzorky zkušebního materiálu (označeno *vnitřní tělesa*), u kterého se předpokládalo vyhodnocení vlivu působení teploty a přehřáté páry během expozice bez působení napětí. Plášť *smyčky* měl být namáhán vnitřním přetlakem přehřáté páry, teplotou a v *komoře* též korozně agresivním popílkem, ve kterém měla být část *smyčky* uložena. Zároveň se předpokládalo uspořádání dvou *smyček* nad sebou.



Obr. 1: Původní návrh konstrukce

### Realizace expoziční smyčky

Pro samotnou realizaci Laboratorní expoziční smyčky byla zvolena smyčka z oceli SUPER 304H. Volba oceli SUPER 304H znamenala současně volbu průměru a tloušťky stěny použitých trubek, neboť trubky z této oceli jsou vyráběny pouze se dvěma průměry, přičemž nám dostupný pro výrobu byl pouze průměr (vnější) 38 mm a tloušťka stěny 6,3 mm. Průměrem a tloušťkou byl zároveň dán objem vztažený na jednotku délky. Celková délka smyčky byla následně určena délkou a množstvím vnitřních těles, resp. požadovaným množstvím zkušebních mikrotěles, které měly být z nich následně odebrány a vyhodnoceny společností COMTES FHT a.s. z Dobřan.

Po úspěšném ověření funkčnosti Laboratorní expoziční smyčky se smyčkou z oceli SUPER 304H byly v zápětí připraveny další smyčky z ocelí SUPER 304H, HR3C a TP 347H FG v různých kombinacích (vše austenitické oceli ve formě přehřívákových trubek s jednotnými rozměry OD 38 x 6,3 mm). Část těchto materiálů byla po technologické úpravě (ohýbání, svařování) ještě před výrobou smyčky podrobena rozpouštěcímu žihání (to se týká i první smyčky z oceli SUPER 304H). Ostatní materiál nebyl nijak dodatečně tepelně zpracován. O výrobu všech svařenců (celkem 6 jednotlivých smyček) se úspěšně postarala firma HBT WELD s.r.o. z Českých Budějovic.

Výsledná realizace Laboratorní expoziční smyčky se rozdělila na dva typy uspořádání, přičemž každý má své výhody a nevýhody. Materiálové hodnocení strukturní stability, korozního



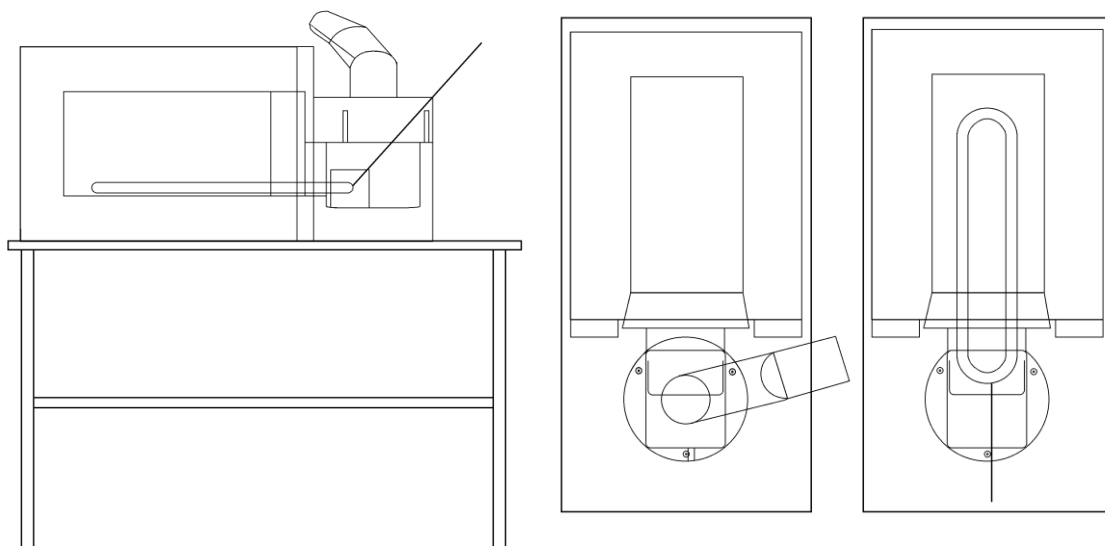
chování a způsobu degradace zkoušeného materiálu jak ve formě smyčky, tak i vnitřních těles lze pak provést ve výrazně širším rozsahu nejen díky využití miniaturizovaných těles, ale také díky těmto dvou variantám uspořádání.

### Sestava typu I

Spojení pece a komory pro korozní zásyp představuje zkušební sestavu typu I, viz obr. 2. Tento typ sestavy využívá rozdílné teploty obou konců vsunuté smyčky k hodnocení gradientního chování materiálu smyčky. Dále předpokládá, že se tím udržuje neustálý pohyb vodní páry uvnitř smyčky (ta se do smyčky dopraví ve formě destilované vody pomocí přivařené trubice v místě jednoho ohybu). Komora navíc umožňuje provádět pokusy s tepelnými šoky (vstříky studené vody na smyčku) bez nebezpečí kontaminace vnitřního prostoru pece. Tento typ sestavy vyžaduje přípravu smyčky o ideální délce minimálně 700 mm. Dále předpokládá umístění vnitřních těles (tři až čtyři kusy) do vnitřního prostoru smyčky.

Nevýhodou tohoto typu sestavy ale je, že proces koroze v zásypu může probíhat pouze na krátkém úseku smyčky a za podstatně nižší teploty (minimálně o 100 °C), než jaká působí na materiál smyčky v peci. Největším nedostatkem však je, že se při tomto typu sestavy z důvodu manipulace exponuje vždy pouze jedna smyčka, a není tedy možné provádět časové řezy hodnocení chování materiálu smyčky, resp. vnitřních těles uvnitř smyčky.

Pro zkušební sestavu typu I byly v letech 2021 a 2022 vyrobeny celkem čtyři smyčky.



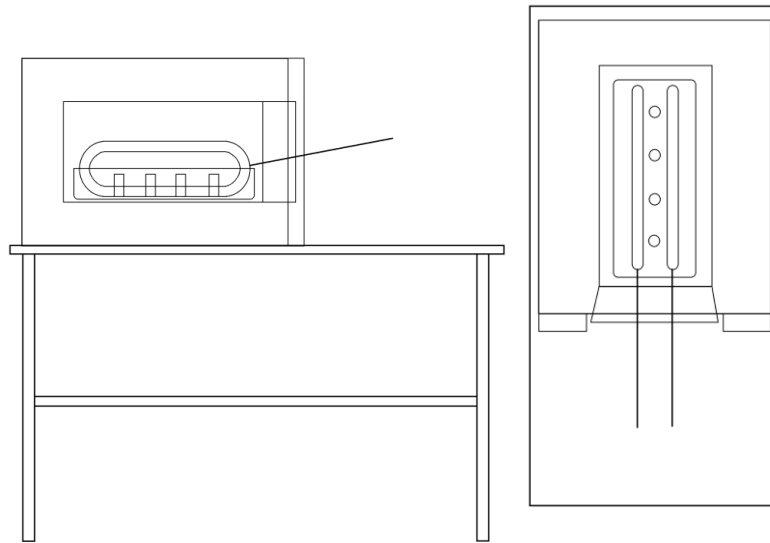
Obr. 2: Zkušební sestava typu I – boční pohled (vlevo) a horní pohled (vpravo, pro lepší přehlednost je tento pohled rozdělen na část s viditelným komínem a s viditelnou smyčkou)

### Sestava typu II

Hlavní nevýhody sestavy typu I (není možné provádět časové řezy hodnocení a koroze v zásypu je limitovaná na krátký úsek smyčky i nižší teplotu) lze vyřešit zkušební sestavou typu II, viz obr. 3. Komora pro korozní zásyp je v tomto případě redukována na nádobu s popílkem, umístěnou přímo do vnitřního prostoru pece. Do této nádoby pak lze umístit dvě smyčky najednou (dva časové řezy hodnocení nebo více typů materiálů), přičemž proces koroze je vyvolán na celé jedné polovině smyčky a za jednotné teploty.

Nevýhodou tohoto typu sestavy je, že uvnitř smyčky nedochází k pohybu vodní páry. Délka smyčky navíc nemůže být větší než 530 mm. Proto se nepředpokládá využití vnitřních těles umístěných do vnitřního prostoru smyčky. Místo nich lze v korozním zásypu či mimo něj exponovat přímo výřezy celých trubek (viz čtyři beztlaké vzorky na obr. 3). Dále je samozřejmě vyloučeno použití kapilárního systému pro teplotní šoky.

Pro zkušební sestavu typu II byly v roce 2022 vyrobeny celkem dvě smyčky.

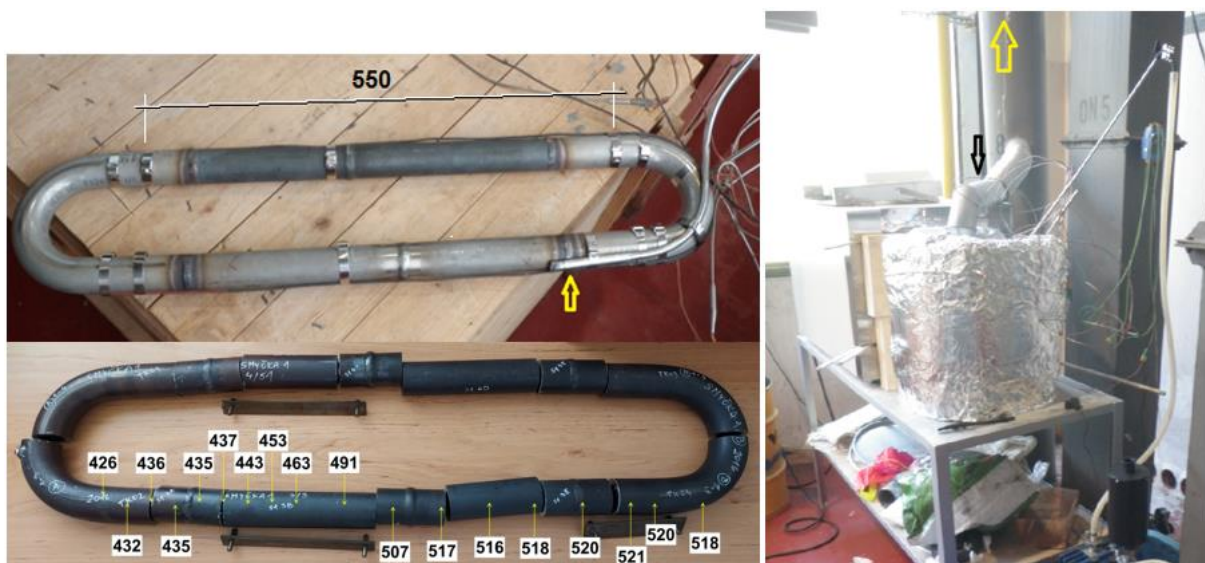


Obr. 3: Zkušební sestava typu II – boční pohled (vlevo) a horní pohled (vpravo)

### První experimentální výsledky

#### Montáž expoziční smyčky

Pro montáž funkčního vzorku Laboratorní expoziční smyčky byla v roce 2021 vybrána smyčka č. 1 z oceli SUPER 304H, viz obr. 4. Ta byla osazena čtyřmi plášťovanými termočládky pro měření teploty. Upevnění termočládků k povrchu bylo provedeno pomocí spon z austenitické oceli. Čtyři termočládky jsou minimální počet, který dává informaci o teplotě každé z větví v ohřívané části smyčky i části, která bude v korozním zásypu. Zároveň snímání teploty dává informaci i o proudění páry ve smyčce. Na chladnou část smyčky byl proti svarovému spoji navíc připevněn přívod pro teplotní šoky. Montáž funkčního vzorku pak spočívala v založení ohřívané části smyčky č. 1 do elektrické pece, dotěsnění průchodu deskou z vláknové keramiky, přisunutí komory pro zásyp a zaizolování (sestava typu I). Část smyčky v komoře pro zásyp byla zatím pouze podložena keramickou deskou a zaizolována sibalovou vatou. Zásyp pro modelování korozního prostředí nebyl v polovině roku 2021 ještě připraven.



Obr. 4: Upevnění termočládků a kapilárního systému (žlutá šipka) k povrchu smyčky č. 1 (vlevo nahoře), naměřené teploty při expozici (vlevo dole) a zaizolování zařízení (vpravo)

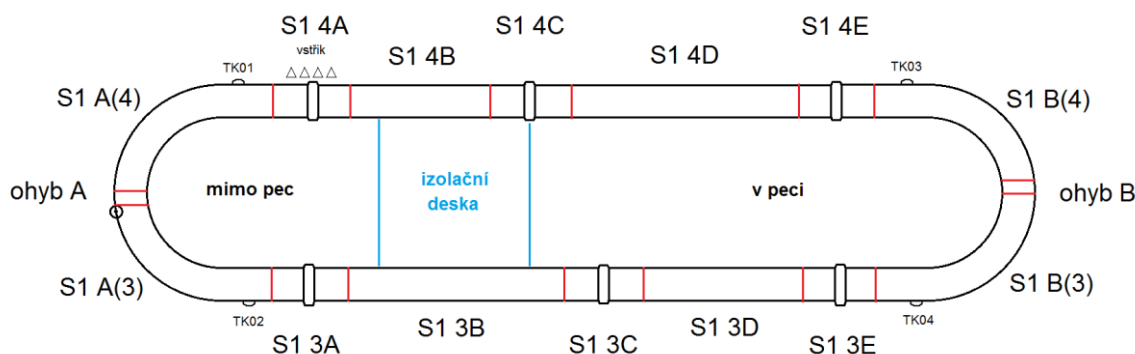
### Testovací provoz

Pro kontrolu montáže vyrobeného funkčního vzorku byla zvolena kontrolní teplota teplé části 520 °C a vnitřní přetlak 15,2 MPa. Vnitřní objem byl přesně určen pyknometricky pomocí vážení. Pro daný vnitřní objem při stanovené teplotě plnění bylo potom spočítáno potřebné množství vody. Po naplnění vnitřního prostoru a evakuace vzduchu byl dotěsněn tlakový snímač a funkční vzor byl připraven k ověřovacímu provozu. Současně byla zavedena provozní kniha *Expoziční smyčky*. Dne 8. 9. 2021 byla spuštěna testovací expozice smyčky č. 1. Během expozice byl zaznamenáván tlak ve smyčce (ten kolísal mezi 15,17 a 15,25 MPa) a teplota na jejím povrchu (ta se lišila podél smyčky až o 100 °C, byla mezi 420–520 °C). Po celkové expozici 5 000 h byla testovací expozice ukončena a smyčka demontována.

### Destruktivní zkoušení

Po demontáži smyčky č. 1, která byla podrobně fotograficky zaznamenána, byla smyčka rozřezána na jednotlivé segmenty, viz obr. 5 a obr. 4 vlevo dole. Rovné části S1 3B, S1 4B a polovina ohybu S1 B(3), v nichž byla umístěna vnitřní tělesa, byly společně s nimi předány do laboratoří COMTES FHT a.s. pro hodnocení degradace pomocí mikrovzorků. V UJP PRAHA a.s. byly následně připraveny zkušební vzorky ze všech šesti svarů a z vrcholů obou ohybů:

- pro každý svar – 2x těleso pro tahovou zkoušku, 4x těleso pro zkoušku rázem v ohybu, 1x metalografický výbrus,
- pro každý ohyb – 1x metalografický výbrus.



Obr. 5: Rozřezový plán smyčky č. 1 po testovacím provozu (malé značky TK0x určují místa měření teploty pomocí termočlánků; kolečko u vrcholu ohybu A je místo přivaření trubice pro naplnění vnitřního prostoru smyčky vodou, na konci trubice je pak umístěn tlakoměr)

Metalografické výbrusy byly hodnoceny z hlediska makro vzhledu svarových spojů, mikrostrukturního rozboru přítomnosti strukturních fází a velikosti zrna, a také bylo stanoveno korozní napadení vnějších i vnitřních povrchů jednotlivých segmentů smyčky. Dále byla u ohybu B provedena kontrola na přítomnost creepových kavit pomocí elektronové řádkovací mikroskopie (SEM). Finálně byla na všech výbrusech změřena tvrdost.

Tahové zkoušky (závitová válcová tělesa s průměrem dříku 5 mm nebo plochá mikrotělesa s tloušťkou 0,5 mm, resp. 1 mm) byly provedeny jak při pokojové teplotě, tak při provozní teplotě 600 °C (pouze mikrovzorky). Kromě hodnocení standardních tahových charakteristik (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, kontrakce) byl také proveden základní fraktografický rozbor lomových ploch. V COMTES FHT a.s. navíc doplnily pevnostní charakteristiky při 20 °C o moduly pružnosti E, G a Poissonovo číslo.

Instrumentované zkoušky rázem v ohybu při pokojové teplotě na redukovaných tělesech (10x5x55 mm) s V vrubem byly provedeny pouze na segmentech se svarovými spoji s tím, že umístění V vrubu bylo buď v tepelně ovlivněné oblasti, nebo ve svarovém kovu.

Cílem mechanického zkoušení a metalografických analýz segmentů bylo nalézt známky počínající degradace oceli vlivem působení napětí, teploty a oxidačního prostředí (vzduchu a vodní páry) během expozice v Laboratorní expoziční smyčce. V případě nalezení těchto známek by byla funkčnost zařízení potvrzena.

#### Výsledky materiálových analýz

Pro makro kontrolu se u svarových spojů v komoře nepodařilo zviditelnit kresbu svarových kovů tak čitelně, jako u svarových spojů exponovaných v peci. Taktéž je méně patrná hranice tepelně ovlivněné oblasti (především zhrblého austenitického zrna) a karbidická řádkovitost základních materiálů. U obou ohybů lze na vnějším povrchu tažené i tlačené části pozorovat neostře známky zhrubnutí zrn.

U svarů exponovaných v peci jsou hranice austenitických zrn zcela korelovány karbidickými precipitáty tvořící tlustou spojitou čáru. Naproti tomu hranice u svarů exponovaných v komoře jsou místy zcela holé. A tam, kde jsou pokryty karbidickými precipitáty, vypadají jako tenká čára. Dále lze u svarů exponovaných v peci dokladovat nejen vyšší míru karbidické precipitace, ale také vyšší míru korozního napadení vnitřního povrchu trubky prostředím vodní páry. Pouze orbitální svary S1 4C a S1 3C se navíc liší v míře korozního napadení jak vnitřního povrchu prostředím vodní páry, také vnějšího povrchu prostředím vzduchu. V oblasti zhrblých zrn totiž došlo k počínající mezikrystalové korozi. Jinak platí, že segmenty s vyšší expoziční teplotou jsou na povrchu pokryty o něco tlustší oxidickou vrstvou. Obdobné rozdíly spojené s vyšší expoziční teplotou jsou patrné také u ohybů. U ohybu B bylo pomocí SEM navíc zjištěno, že některé částice stabilizačních karbidů podléhají dekohezi a vypadávají z matrice, a na některých se tvoří creepové kavity. Creepové poškození je teprve v začátku, ale vliv vnitřního namáhání je již po 5 000 h zřejmý.

Výsledky měření tvrdosti, pevnosti a vrubové houževnatosti potvrdily závislost na expoziční teplotě. S vyšší teplotou narostly jak tvrdost, tak pevnost, zatímco houževnatost naopak klesla.

V materiálu oceli SUPER 304H tak byly nalezeny očekávané známky komplexní degradace, které potvrzují funkčnost zařízení *Laboratorní expoziční smyčka*.

#### Závěr

Myšlenka technického řešení zařízení pro přípravu vzorku pro zjišťování materiálových vlastností kovů a jejich slitin byla patentována formou užitého vzoru č. 35292 Úřadem průmyslového vlastnictví dne 3. 8. 2021. Tímto dokumentem je chráněna funkce smyčky a způsob vyvinutí vnitřního přetlaku v ní.

Funkční vzorek Laboratorní expoziční smyčky, umístěný v laboratorní hale IV společnosti UJP PRAHA a.s., prošel testovacím provozem v sestavě typu I (smyčka č. 1). Ten byl po 5 000 h expozice při teplotě 420 – 520 °C s vnitřním přetlakem cca 15 MPa ukončen (9. 4. 2022) a funkčnost celého zařízení byla ověřena destruktivními materiálovými zkouškami. Po jejich kladném výsledku byl dne 8. 11. 2022 zahájen běžný provoz opět v sestavě typu I s korozním zásypem (smyčka č. 2). V prosinci 2022 pak byla zkompletována projektová dokumentace k funkčnímu vzorku s názvem „*Projektová dokumentace expozičního kanálu pro stavu miniaturních vzorků pro komplexní hodnocení teplotní degradace*“.

V současné době má smyčka č. 2 za sebou již více jak 7500 hodin expozice při teplotě 460 – 550 °C s vnitřním přetlakem 23,5 MPa a se 12 teplotními šoky.

#### Poděkování

Tento příspěvek vznikl při řešení výzkumných projektů, financovaných se státní podporou Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a Technologické agentury ČR v rámci programů TRIO (projekt č. FV40166) a THÉTA (projekt č. TK05020109).

## VÝVOJ A VYUŽITÍ NÍZKOTEPLNÍHO OZAŘOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ JADERNÝCH REAKTORŮ

### DEVELOPMENT AND USE OF LOW-TEMPERATURE IRRADIATION OF NUCLEAR REACTOR STRUCTURAL MATERIALS

Jitka Kahoun Hejhalová, Miloš Kytka, Radim Kopřiva, Milan Pěnkava a Witolda Soukupová  
ÚJV Řež, a. s.

#### Abstrakt

Prodlužování životnosti v současnosti provozovaných jaderných reaktorů za jejich plánovanou životnost je v rámci procesů řízeného stárnutí spjata s nutností periodického hodnocení všech komponent vůči veškerým působícím degradačním mechanismům.

Nejvýznamnějším degradačním mechanismem je radiační křehnutí, kterému je primárně vystavena tlaková nádoba reaktoru a její vnitřní části. Z důvodu předpokládaného prodlužování provozu JE dojde ke zvýšenému vlivu toku neutronů i na komponenty mimo aktivní zónu, které pro původní projektovou životnost nebylo nutné posuzovat, proto je nutné hodnotit i tyto oblasti reaktoru.

Příspěvek popisuje principy nově vyvinutého konceptu nízkoteplotního ozařování na experimentálním reaktoru, který je realizován za účelem získání informací nezbytných pro zajištění bezpečného a dlouhodobého provozu jaderných reaktorů.

#### Abstract

The extension of the lifetime of currently operating nuclear reactors beyond their design lifetime is linked to the need for periodic evaluation of all components against all degradation mechanisms in the context of controlled aging processes.

The most significant degradation mechanism is radiation embrittlement, to which the reactor pressure vessel and its internal parts are primarily exposed. Due to the anticipated prolongation of the NPP operation, there will be an increased influence of neutron flux on components outside the active zone that did not need to be assessed for the original design lifetime, therefore it is necessary to assess also these areas of the reactor.

This paper describes the principles of a newly developed concept of low-temperature irradiation on an experimental reactor, which is being implemented to provide the information necessary to ensure the safe and long-term operation of nuclear reactors.

#### Úvod

Z důvodu prodlužování životnosti provozovaných jaderných reaktorů nejen v České republice se oblasti nutného monitorování radiačního křehnutí postupně rozšiřují z komponent tlakové nádoby reaktoru (TNR) v aktivní zóně (AZ) a vnitřních částí reaktoru (VČR) na konstrukční části i mimo AZ. Jednou z těchto oblastí je opěrný systém TNR. Při původně plánované době životnosti jaderných elektráren je radiační zátěž oblasti opěrného systému u TNR typu VVER 440 a VVER 1000 pod limitem, který byl historicky experimentálně stanoven pro materiály doporučené pro výrobu všech komponent TNR a VČR. Pro prodlužování provozu nad 40 let je nutné kumulaci obdrženého radiačního zatížení konstrukčních materiálů v oblasti opěrného systému TNR sledovat a vyhodnocovat.

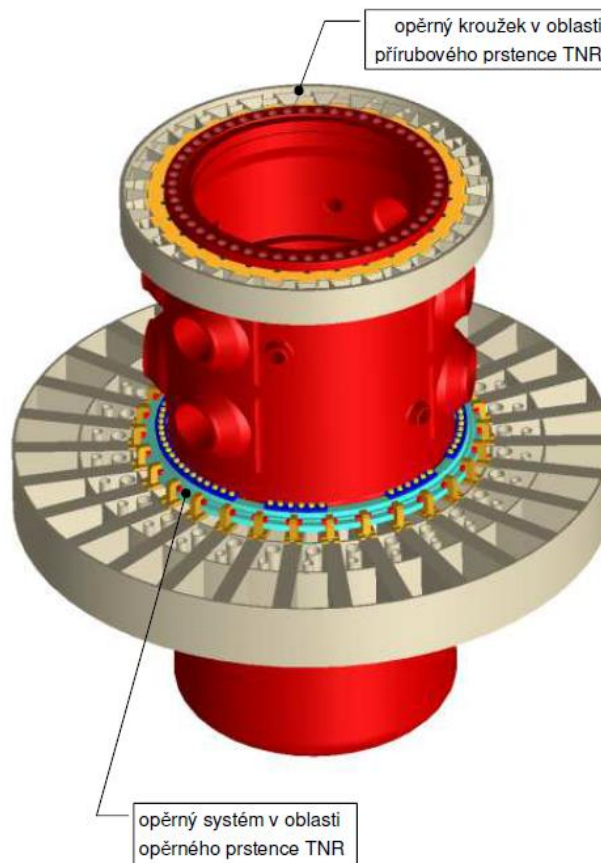
Z výše uvedeného důvodu byl sestaven rozsáhlý ozařovací plán pro reprezentativní materiály opěrného systému TNR typu VVER 440 a VVER 1000, vycházející z výpočtových modelů pro stanovení požadovaných ozařovacích teplot a fluencí. Tyto modely byly a jsou zpřesňovány



i experimentálně pomocí měření teplot a fluencí přímo na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín.

Plán ozařování jednotlivých konstrukčních materiálů zahrnuje široké spektrum ozařovacích teplot – pohybujeme se s požadavky na ozařování od 60 °C až k nejvyšším teplotám okolo 220 °C – tato nejvyšší teplota je o několik desítek stupňů nižší než je standardní teplota ozařování materiálů TNR v AZ, zároveň materiály opěrného systému obdrží relativně nízké fluence. Pro plán ozařování byl vyvinut nový koncept nízkoteplotního ozařování ve spolupráci s Centrem výzkumu Řež s.r.o. pro experimentální ozařování ve výzkumném reaktoru LVR-15.

V příspěvku jsou uvedeny nejzásadnější řešené problematiky při vývoji nového konceptu nízkoteplotního ozařování.



Obr. 1: 3D model TNR VVER 1000 s opěrnými a upevňovacími prvky

### Schránky pro nízkoteplotní ozařování v LVR-15 a problematika jejich ozařování

Standardní experimentální ozařování zkušebních těles pro mechanické zkoušky pro materiály TNR, případně VČR, jsou uskutečňovány v sondách umístěných přímo v zóně výzkumného reaktoru LVR-15. Dosažitelné teploty ozařování u této metody je možné zvolit od 200 až po maximálně 350°C. Ozařování musí probíhat minimálně 2 kampaně (vždy sudý počet kampaní), protože sonda musí být otočena, aby zkušební tělesa v nosiči obdržela stejnou fluenci z obou stran. Otočení sondy probíhá při odstávce reaktoru.

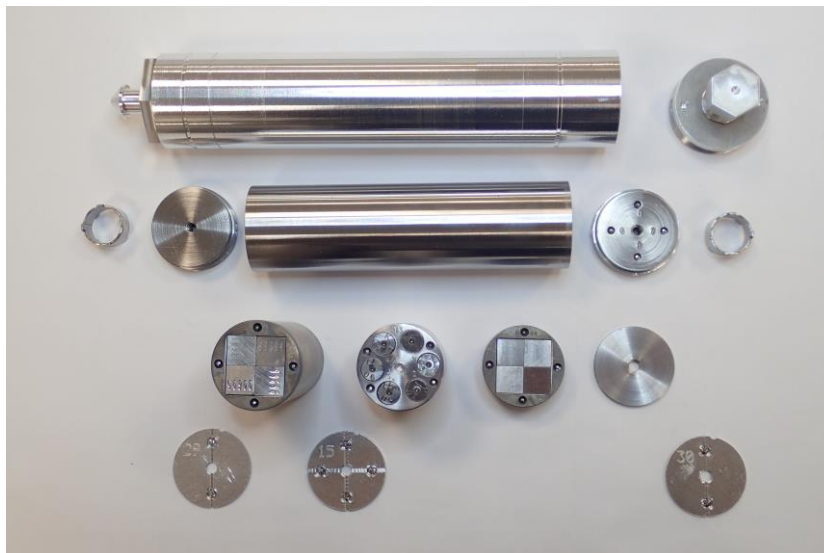
Tyto popsané skutečnosti zcela vyloučily použití tohoto postupu k realizaci rozsáhlého ozařovacího plánu pro reprezentativní materiály opěrného systému TNR, a to nejen kvůli rozsahům dosahovaných teplot a obdržených fluencí (řešené fluence pro opěrné systémy TNR jsou minimálně o řád nižší), ale i počtem ozařovaných zkušebních těles na stejných parametrech – při souboru až 6-ti různých materiálů je nutná flexibilita.

Ozařování ve výzkumném reaktoru LVR-15 lze uskutečnit pouze v rotačních vertikálních kanálech, do kterých je možné zakládat a vyjímat schránky se zkušebními tělesy během probíhající kampaně, bez nutnosti odstavení reaktoru, a to z toho důvodu, že požadované fluence je dosaženo u některých ozařovacích teplot už v řádu jednotek hodin po vložení do kanálu.

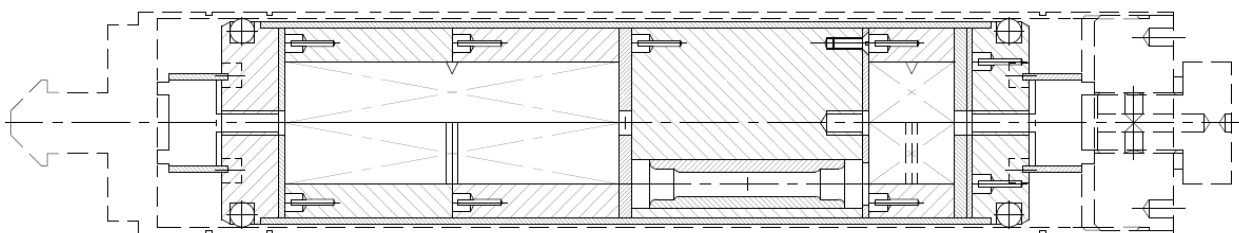
Zvolené vertikální kanály jasně definovaly okrajové limitní podmínky pro rozměry schránek a design z důvodu nutnosti použití závážecího zařízení, které je uzpůsobeno k manipulaci u těchto kanálů. Zároveň uvnitř schránky musela být umístěna zkušební tělesa a další komponenty tak, aby vytvořily kompaktní vyplněný ocelový válec, aby byl zajištěn homogenní přenos tepla.

Kompaktní ocelový válec je složen z nosiče zkušebních těles (ocelová trubka s víčky), ve kterém jsou umístěny jednotlivé ocelové bloky s otvory na zkušební tělesa, držáky s kovovými fóliemi (slouží jako monitory fluencí), a dalšími díly k úplnému vyplnění objemu nosiče.

Na obr. 2 jsou všechny tyto komponenty vidět – nejnižší jsou očíslované držáky s monitory fluencí, nad nimi jsou očíslované bloky se založenými zkušebními tělesy, ve kterých jsou patrné i tavné indikátory teplot. Nad bloky se nachází trubka ocelového nosiče s víčky, ve kterých jsou keramické kuličky k zajištění obvodové mezery, a distanční výplně. Zcela nahoře je vnější hliníková schránka s víčkem a ventilem.



Obr. 2: Komponenty schránky pro nízkoteplotní ozařování před kompletací



Obr. 3: Schéma sestavené schránky se zkušebními tělesy pro nízkoteplotní ozařování

Typ a počet ozařovaných zkušební těles v jedné schránce závisí na typu konfigurace schránky.

Rotace schránek v kanálech, používaných pro tento projekt, je výhodná díky rovnoměrné distribuci fluencí ve schránce pro jednotlivá zkušební tělesa. Zároveň je tento fakt ale i nevýhodou – schránka musí být bez instrumentace.

To znamená, že do schránky nemohou být zavedeny termočlánky, které by během ozařování měřily aktuální teplotu. K ověření nejvyšší dosažené teploty při ozařování bylo nutné využít pasivní metodu monitorování – tavné indikátory teplot (TIT), které se běžně využívají i v případě ozařování v rámci svědečného programu na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Podstatný rozdíl byl v tom, že bylo nutné zajistit sadu takových čistých kovů a slitin kovů, které svojí teplotou tání pokryjí celou škálu plánovaných ozařovacích teplot.

Důležitým faktorem toho, aby daný čistý kov nebo slitina kovů byla dobře použitelným TIT je to, že se taví ve velmi malém intervalu teplot, zhruba v rozsahu do 5°C. Na základě norem a dostupných informací byly vytipovány k použití jako TIT vhodné kovy a slitiny kovů, které byly vyrobeny dodavatelem ve formě drátů o průměru 1 až 2 mm. [1, 2]

Před samotným použitím jsme provedli kontrolní analýzu chemického složení, ověření homogenity, analýzu pomocí diferenční skenovací kalorimetrie a experimentální provedení natavení vzorků drátů v peci, v přípravku simulujícím umístění drátů ve schránce při ozařování. Na základě experimentálních výsledků kontrolního ověření byly vybrány pouze čisté kovy a slitiny kovů se spolehlivě rozpoznatelným natavením.

Ve schránce je vždy použito několik sad stejných čtveřic TIT, s teplotou blízkou požadované ozařovací teplotě, umístěných do bloků okolo zkušebních těles, v několika úrovních po délce schránky. Při skládání schránky jsou TIT v blocích dokumentovány a následně po ozáření je porovnán jejich stav – TIT, které se roztavily, případně natavily, nám indikují nejvyšší dosaženou teplotu v dané úrovni ve schránce. Vyhodnocování stejně tak jako další kroky ohledně TIT jsou prováděny v souladu s normou ASTM. [1]



Obr. 4: Blok na zkušební tělesa pro tahové zkoušky s TIT

Z důvodu rotace schránek není možné mít zavedený ani přívod inertního plynu hélia, případně směsi helia a argonu, kterými lze průběžně během ozařování upravovat dosahovanou teplotu ozařování v případě instrumentovaných sond umístěných přímo v zóně. U neinstrumentovaných schránek je nutné inertní plyn, v tomto případě hélium, zatěsnit ve schránce před samotným ozařováním. Inertní plyn zároveň funguje jako ochranná atmosféra proti oxidaci.

Ve schránce generuje teplo zejména gama ohřev (radiační ohřev) při ozařování. Abychom docílili požadovaných různých teplot dle ozařovacího plánu, je mezi vnější hliníkovou schránkou a ocelovým nosičem zkušebních těles cíleně ponechávána mezera vyplněná héliem – tzv.

héliová mezera. Hélium zde slouží jako izolační teplosměnné medium. S rostoucí tloušťkou héliové mezery zůstává více tepla v nosiči zkušebních těles. Při nízké nebo dokonce žádné héliové mezeře je generované teplo více odváděno do okolního prostředí. Používané héliové mezery jsou v řádu jednotek desetin mm, maximální mezera je z důvodu výrobních limitů tenkostěnné trubky nosiče 1 mm.

Správnost výpočtových modelů velikosti héliových mezer k dosažení požadovaných teplot ozařování, které zajišťovali ve spolupráci odborní pracovníci z Centra výzkumu Řež s.r.o., byla ověřována na základě experimentálních ozařování tzv. monitorovacích schránek. Tyto schránky obsahovaly pouze širokou škálu TIT a monitory fluencí. Díky těmto schránkám byl zpřesněn radiační ohřev v jednotlivých rotačních kanálech a adjustována nutná velikost héliových mezer pro dosažení dané teploty ozařování.

Přítomnost hélia ve schránce klade vysoké nároky na kvalitu svaru sloužícího k uzavření schránky. Jakákoli vada svaru by zapříčinila únik hélia ze schránky a tím i k nežádoucímu zvýšení teploty ve schránce během ozařování.

Požadované kvality bez nadměrného zahřátí schránky dosahujeme pomocí elektronového svařování bez přídavného materiálu, pro které jsme zoptimalizovali svařovací podmínky. Těsnost svaru je následně kontrolována pomocí héliového hledače netěsností.



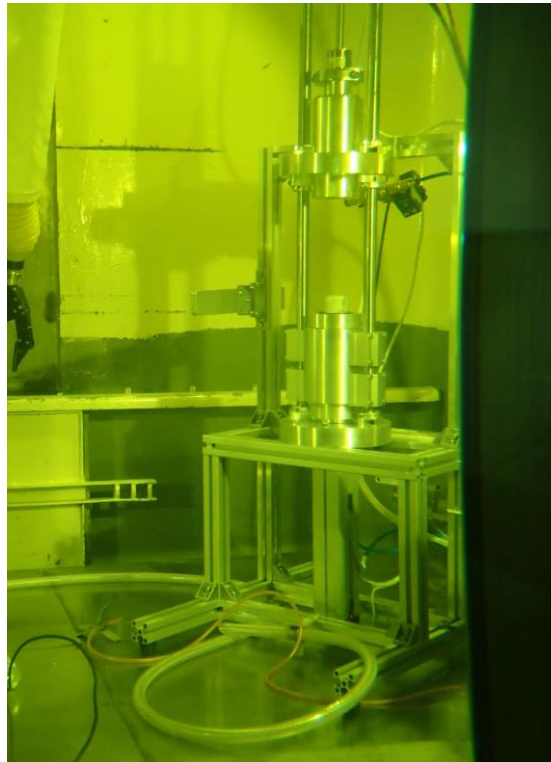
Obr. 5: Ukázka svaru uzavírající schránku

Následuje zatěsnění schránky pomocí poloautomatického vakuového zařízení, ve kterém je schránka evakuována a naplněna héliem s přetlakem 20 kPa. V této atmosféře je schránka uzavřena ventilem, přesně dotaženým pomocí momentového klíče. Utěsnění schránky probíhá na styku hliníkové víčko – hliníková žíhaná podložka – hliníkový ventil (speciálně uzpůsobený šroub). Tento fakt přináší velký nárok na kvalitu provedení dosedacích ploch, které musí být soustředně soustružené. Poté je těsnost schránky ověřena pomocí héliového hledače. V případě vyhovujícího výsledku kontroly je schránka předána k ozařování.

Po ozaření je schránka jako otevřený radionuklidový zářič dopravena příslušnými stíněnými obalovými soubory z výzkumného reaktoru zpět na pracoviště horkých a polohorkých komor, kde probíhá řízené odtakování schránky pomocí dalšího poloautomatického vakuového zařízení. V tomto přístroji je schránka uzavřena do komory, která je evakuována na nízký tlak – 500 Pa. Následně dojde k navrtání ventilu schránky a kontrole přítomnosti hélia. Po tomto ověření je schránka rozříznuta a jsou z ní vytržena zkušební tělesa, bloky s monitory teplot a monitory fluencí.



Veškeré činnosti probíhají na základě schválených pracovních postupů a jsou podrobně dokumentovány.



Obr. 6: Poloautomatické vakuové zařízení pro kontrolu tlaku a obsahu He ve schránce umístěné v horké komoře

### Závěr

Po vyřešení všech výše nastíněných problematik je výsledkem spolehlivý koncept pro ozařování zkušebních těles ve velkém rozsahu fluencí a od velmi nízkých ozařovacích teplot okolo 60 °C až k teplotám odpovídajícím podmínkám v oblasti aktivní zóny TNR. Do této chvíle byly ozářeny více než 3 desítky schránek.

Shrnutí jednotlivých kroků při přípravě schránek pro nízkoteplotní ozařování:

- příprava výkresové dokumentace a kompletace schránky,
- zavaření závitu schránky a ověření těsnosti svaru,
- naplnění schránky héliem, uzavření a kontrola těsnosti,
- ozáření schránky,
- odtlakování a ověření přítomnosti hélia ve schránce po ozáření,
- rozříznutí schránky, odzkoušení zkušebních těles a vyhodnocení monitorů teplot a fluencí.

### Literatura

- [1] ASTM E 1214 – 11 (Reapproved 2023): Standard Guide for Use of Melt Wire Temperature Monitors for Reactor Vessel Surveillance.
- [2] ČSN EN ISO 9453. *Slitiny pro měkké pájení – Chemické složení a tvary*. Česká agentura pro standardizaci, 2021.



## **MĚŘENÍ DEFORMACE PAZ ETE VVER 1000 ZA ÚČELEM ZJIŠTĚNÍ NULOVÉHO STAVU PAZ VZHLEDEM K ROZVOJI SWELLINGU**

### **MEASUREMENT DEFORMATION OF THE PAZ ETE VVER 1000 FOR DETERMINING THE ZERO STATE OF THE PAZ DUE TO THE DEVELOPMENT OF SWELLING**

Lukáš Húska

ÚJV Řež, a.s.

#### **Abstrakt**

Cílem programu Řízené stárnutí pro reaktory je pomocí požadovaných informací určit aktuální stav tlakové nádoby a vnitřních částí reaktoru. Jedním z identifikovaných degradačních mechanismů (DM), které mají vliv na provozuschopnost reaktorů je radiační bobtnání neboli swelling. Tento DM je významný zejména u částí, které jsou vystaveny vysokým radiačním dávkám za vysokých teplot. Pro prokázání stavu pláště aktivní zóny (PAZ) reaktoru VVER 1000 bylo vyvinuto měřicí zařízení PAZ (MZP) v ÚJV Řež, a. s. a realizováno prvotní měření pro stanovení tzv. nultého stavu.

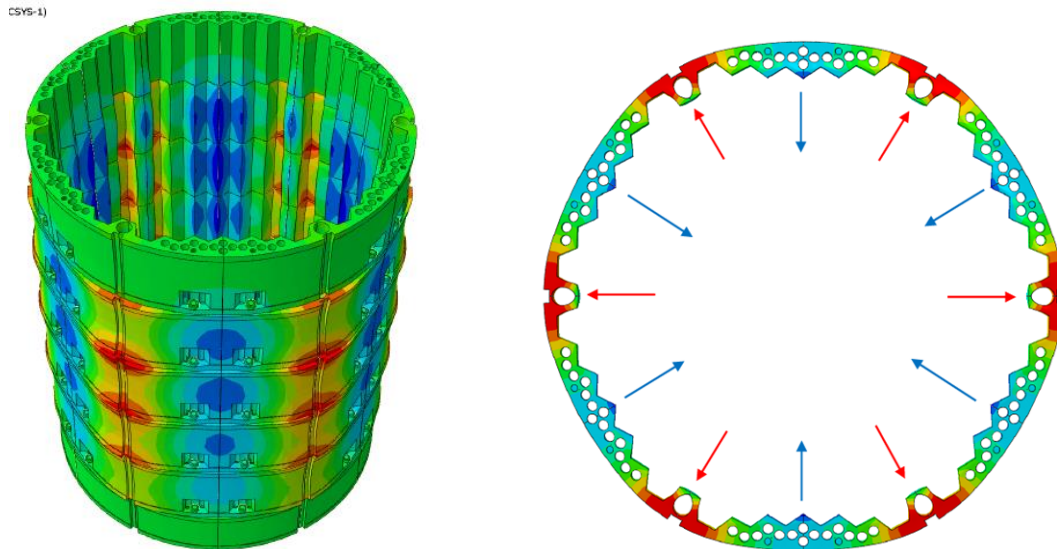
#### **Abstract**

The goal of the Controlled aging program for reactors is to use the required information to determine the current condition of the pressure vessel and internal parts of the reactor. One of the identified degradation mechanisms (DM) that affect the operability of reactors is radiation swelling. This DM is particularly significant for parts that are exposed to high radiation doses at high temperatures. In order to prove the state of the active zone shell (PAZ) of reactor VVER 1000, a Measuring Device PAZ (MZP) was developed at ÚJV Řež, a. s. and an initial measurement was carried out to determine the so-called zero state.

#### **Degradační mechanismus swelling**

Swelling je degradační mechanismu (DM) prokázáný u radiačně a tepelně zatížených komponent. Podmínkou vzniku je silné neutronové záření a teploty nad 350 °C. U swellingu dochází ke změnám v mikrostruktuře materiálu a dochází k degradaci mechanických vlastností zejména křehnutí. Tímto DM je postihnut plášť aktivní zóny (PAZ). Jedná se o vnější část reaktoru VVER 1000, který se nachází v obou blocích JE Temelín. Skládá se celkem ze šesti svařovaných prstenců z nerezové oceli, které jsou navzájem sešroubované k sobě. Vnější průměr PAZ je 3,5 m a výška 4 m. Pokud by došlo k příliš velké deformaci PAZ mohly by vzniknout problémy při výměně paliva.

Na základě MKP výpočtů byl vytvořen model předpokládané deformace PAZ, viz obr. 1 a obr. 2. Pro potvrzení matematického modelu vznikl požadavek na experimentální ověření – vývoj speciálního měřicího zařízení.



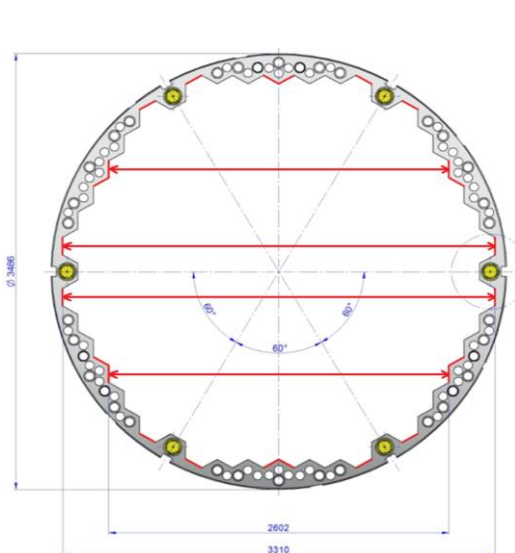
Obr. 1: Grafické znázornění deformací PAZ    Obr. 2: Předpokládaný směr deformací

### Podmínky měření a vývoj měřicího zařízení PAZ (MZP)

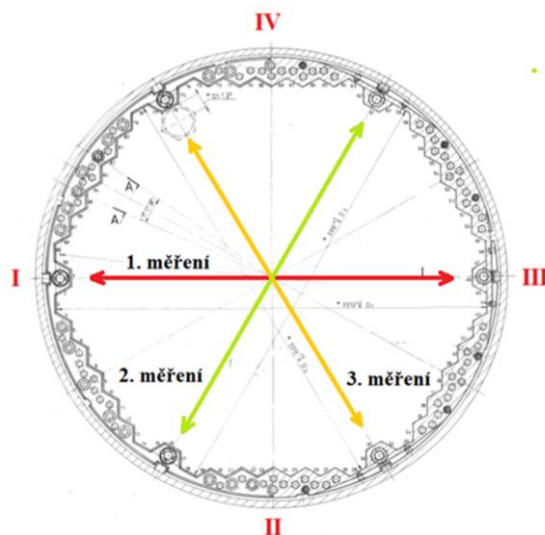
Pro úspěšné změření PAZ bylo potřeba, aby MZP splňovalo několik podmínek:

- měřit požadované rozměry s odchylkou 0,25mm,
- odolávat radiaci,
- měřit až do hloubky 15 m pod hladinou v roztoku kyseliny borité,
- kompenzovat rozdílné teploty od 35 °C do 50 °C během měření.

Pro samotné měření byly zvoleny vnitřní protilehlé plochy zobrazené na obr. 3, které jsou od sebe vzdálené 3310 mm a 2602 mm. Tyto vzdálenosti by měly být změřeny po celém obvodu PAZ, tedy ve třech směrech viz obr. 4. Bylo navrženo celkem 36 odměrů ve třech výškách pro každý prstenec, kromě posledního nejnižšího, pro který bylo možné realizovat pouze 24 odměrů.

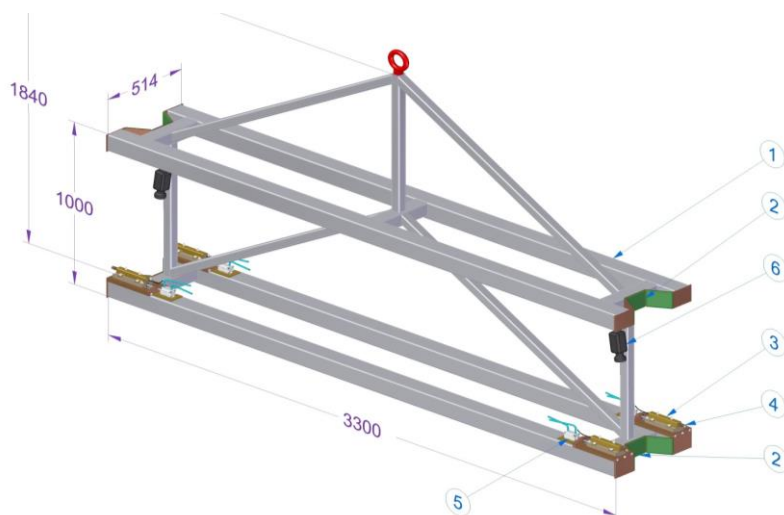


Obr. 3: Červeně označené měřené plochy PAZ



Obr. 4: Směry měření PAZ

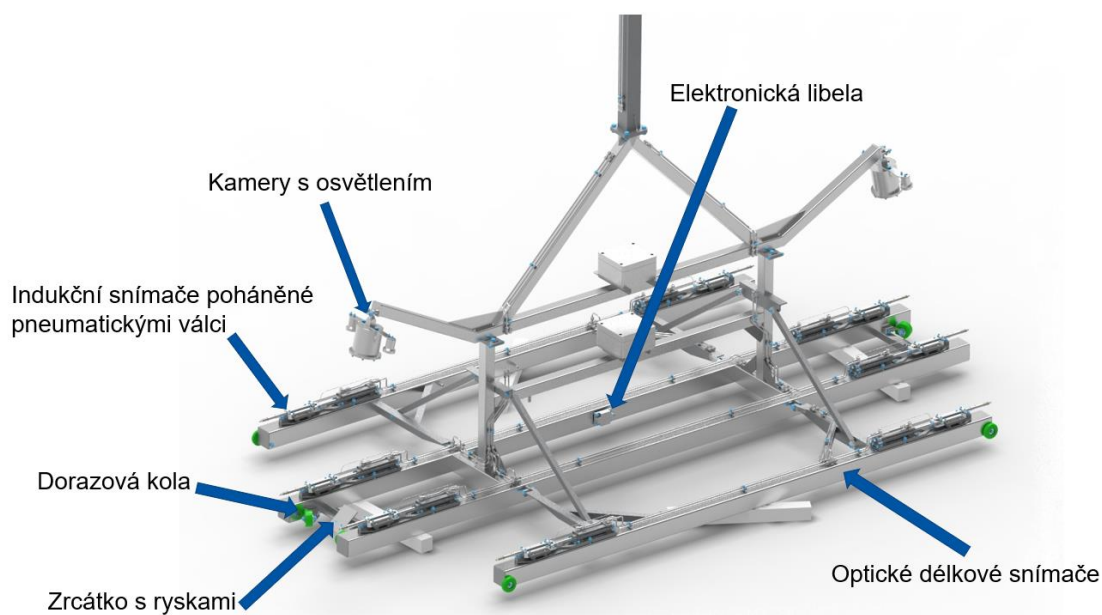
V letech 2014–2015 proběhla v ÚJV Řež, a.s. studie proveditelnosti, v letech 2016–2020 proběhl vývoj a výstavba měřicího zařízení a v letech 2021–2022 pak probíhalo testování a kalibrace měřidel. MZP prošlo několika změnami, kdy se od poměrně jednoduché konstrukce viz obr. 5 vyvinulo v unikátní a důmyslné měřicí zařízení viz obr. 6.



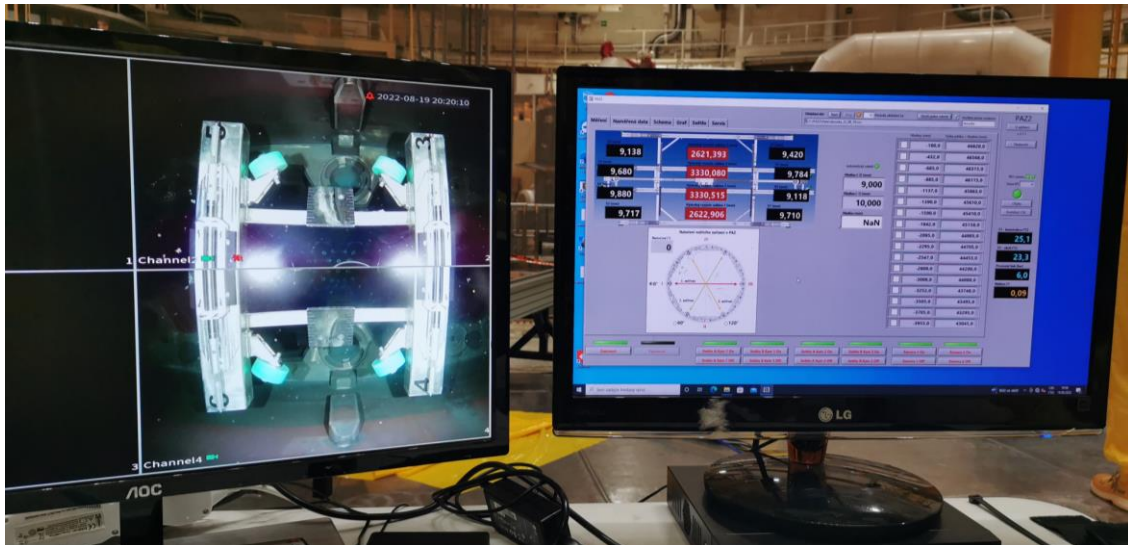
Obr. 5: Prvotní návrh MZP

### Konstrukce MZP

Bylo navrženo měřicí zařízení svařované konstrukce z nerezové oceli. Hlavní část tvoří 4 nosníky, které jsou na obou koncích osazeny měřicími jednotkami. Jednotka se skládá s z radiálně odolného indukčního snímače na kolejovém pojezdu pohaněném pneumatickým válcem. Indukční snímače slouží jako primární měřidlo vzdálenosti ploch. Mezi jednotkami je uvnitř nosníku umístěno optické vlákno, které hlídá vzájemnou polohu koncových indukčních snímačů. Optické vlákno měří deformaci nosníku vlivem teplotní roztažnosti. Součástí konstrukce je teploměr, aby bylo možné naměřené hodnoty ověřit výpočtem. Ve středu rámu je elektronická libela, která slouží pro zjištění odchylky vlivem náklonu. MZP je během měření zavěšeno na polárním jeřábu reaktorového sálu. Celý průběh měření pak lze sledovat pomocí kamer s osvětlením. Výstup z kamer a interface měřicího software je vidět na obr. 7.



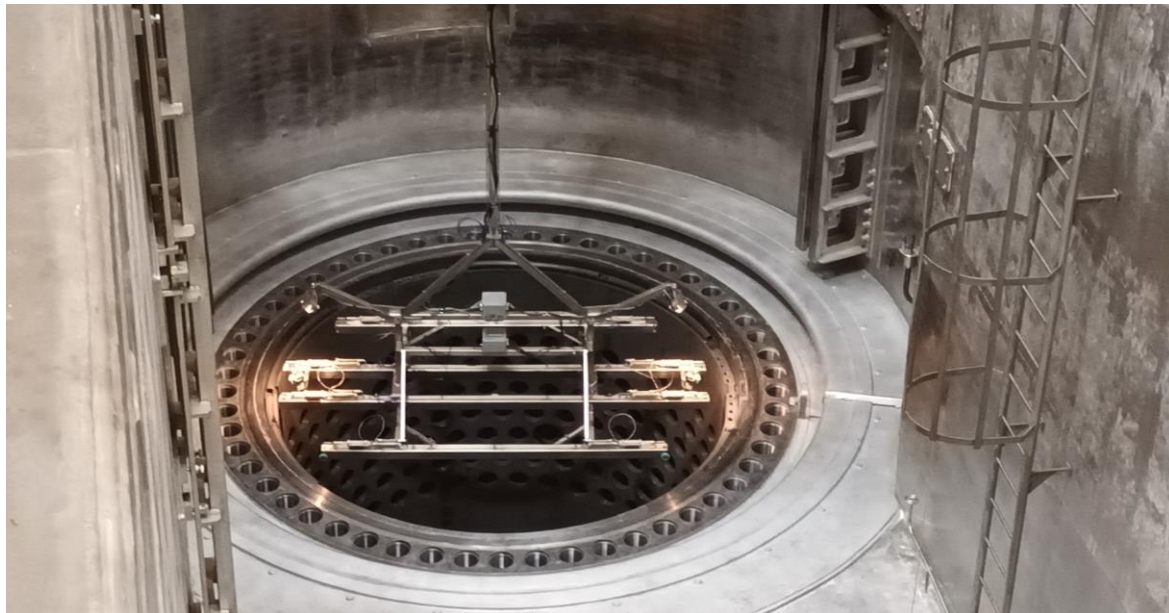
Obr. 6: Popis konstrukce MZP



Obr. 7: Obrazový výstup z kamer a měřící software

### Měření rozměrů PAZ

V roce 2022 bylo provedeno první měření na 2. bloku JE Temelín a v roce 2023 na 1. bloku. Na obr. 8 lze vidět zavěšené MZP při spouštění do reaktoru. Na naměřených hodnotách je možné sledovat náznaky swellingu a radiačního creepu. Nicméně tato prvotní měření mají sloužit hlavně jako referenční pro měření následující. V závislosti na současném stavu PAZ bude zvolen interval 5 – 7s let, kdy se bude PAZ na obou blocích měřit znovu a budou se porovnávat naměřené hodnoty. Tím bude možné získat data o rozvoji swellingu v závislosti na čase. Naměřená data jsou aktuálně vyhodnocována oddělením pro hodnocení pevnosti a životnosti v ÚJV Řež, a. s.



Obr. 8: MZP spouštěné do reaktoru 1. bloku JE Temelín



## TECHNOLOGIE PRO ZKOUŠKY ZAŘÍZENÍ NA PODMÍNKY LOCA HAVÁRIE

### TECHNOLOGY FOR EQUIPMENT TESTING FOR LOCA ACCIDENT CONDITIONS

Karel Andrlé

ÚJV Řež, a. s.

#### Abstrakt

Představení nedávno rekonstruované technologie v ÚJV pro simulaci LOCA havárií na jaderných elektrárnách. Technické řešení LOCA sestavy, její parametry, popis principu funkce. Zkoušené teplotně-tlakové profily pro různé JE a jejich specifika. Popis průběhu kvalifikace zařízení pro provoz na JE s důrazem na LOCA zkoušku a testování zachování bezpečnostní funkce zařízení během havárie. Příklady prováděných zkoušek.

#### Abstract

Presentation of recently upgraded technology in ÚJV for simulations of LOCA accidents on nuclear power plants. The technical solution of LOCA test assembly, its parameters and description of functional principles. Tested temperature-pressure profiles for different nuclear power plants and their specifics. Description of the equipment qualification process for equipment testing on the conditions of NPPs with emphasis on LOCA testing and testing of equipment's function during an accident. Examples of performed tests.

#### Kvalifikace zařízení pro jaderné elektrárny

Proces kvalifikace zařízení pro JE se skládá ze sekvence několika základních zkoušek. V detailnějším rozpracování se pak předepsané zkoušky mohou do velké míry lišit v závislosti na typu, konstrukci, funkci, použití či materiálovém složení zařízení. Obecně se jedná o sled následujících procesů:

1. testování funkce zařízení,
2. simulace provozního tepelného stárnutí,
3. testování funkce zařízení,
4. simulace provozního radiačního stárnutí,
5. testování funkce zařízení,
6. simulace vibračního stárnutí a seismické události,
7. testování funkce zařízení,
8. cykly – mechanické, tepelné atd.,
9. testování funkce zařízení,
10. simulace havarijní radiační dávky,
11. simulace LOCA havárie s testováním funkce zařízení v průběhu zkoušky,
12. testování funkce zařízení.

Testovanými zařízeními je široká škála výrobků používaných na JE. Například se jedná o kabely (včetně optických), kabelové konektory nebo průchodky, různé druhy senzorů a spínačů, ventily, těsnění, nátěry či izolace.

#### Simulace LOCA havárie

LOCA havárie na jaderné elektrárně je havárií s únikem chladiva z primárního potrubí. Médium je pára o vysokých parametrech.

Pokud by se dané zařízení v okamžiku LOCA havárie nacházelo například právě pod tímto prasklým potrubím, musí vydržet vzniklé podmínky, tj. jak ve smyslu zachování integrity,



tak ve smyslu funkčnosti. Zařízení musí zůstat schopno vykonat svou funkci v daný okamžik, nebo po danou dobu.

### LOCA simulátor ÚJV

V ÚJV Řež provozuje oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí provozuje simulátor LOCA havárií (obr. 1). Jedná se o sestavu tří tlakových nádob – vyvíječ páry, přehřívák páry a LOCA nádoba. Tyto prvky jsou propojeny potrubím s ručně i elektricky ovládanými ventily. Dalšími součástmi sestavy jsou čerpadlo sprchového roztoku, zdroj tlakového vzduchu a chladicí smyčka.



Obr. 1: Simulátor LOCA havárií v ÚJV

Základní dosažitelné parametry páry jsou pro vyvíječ 175 °C, 9 bar(g), následně v přehříváku lze páru přehřát až na 300 °C. S touto parou je pak možné v LOCA nádobě dosáhnout parametrů až 250 °C při maximálním tlaku 7,5 bar(g).

Základní objem LOCA nádoby je 160 litrů (obr. 2), ale mezi tělo nádoby a víko lze vložit tzv. mezikus a zvětšit zkušební objem pro umístění vzorků na 300 litrů (obr. 3). S tím je ale spojen delší čas potřebný pro dosažení maximálních parametrů v LOCA nádobě.

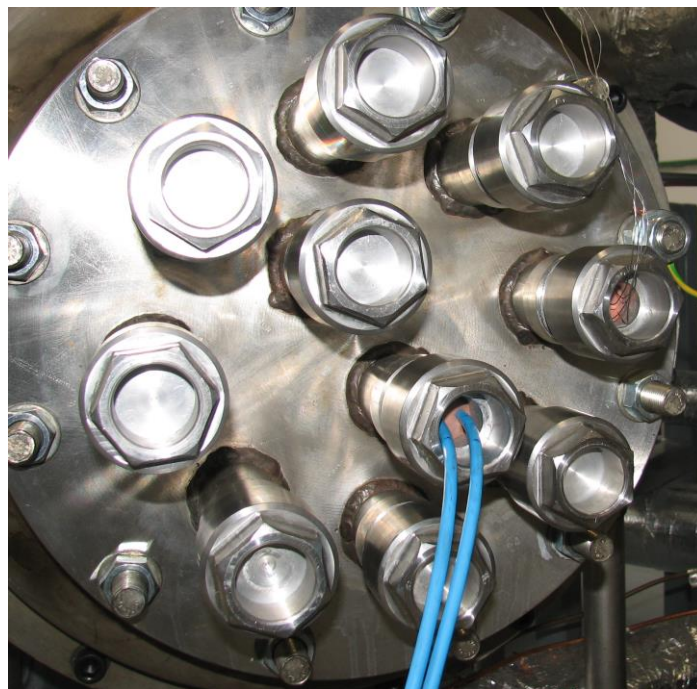


Obr. 2: LOCA nádoba



Obr. 3: Mezikus LOCA nádoby

Měření pro kontroly a zkoušky funkce zařízení během simulace parotlakového profilu jsou vyvedena skrz víko díky až 10 speciálně těsněným nátrubkům (obr. 4).



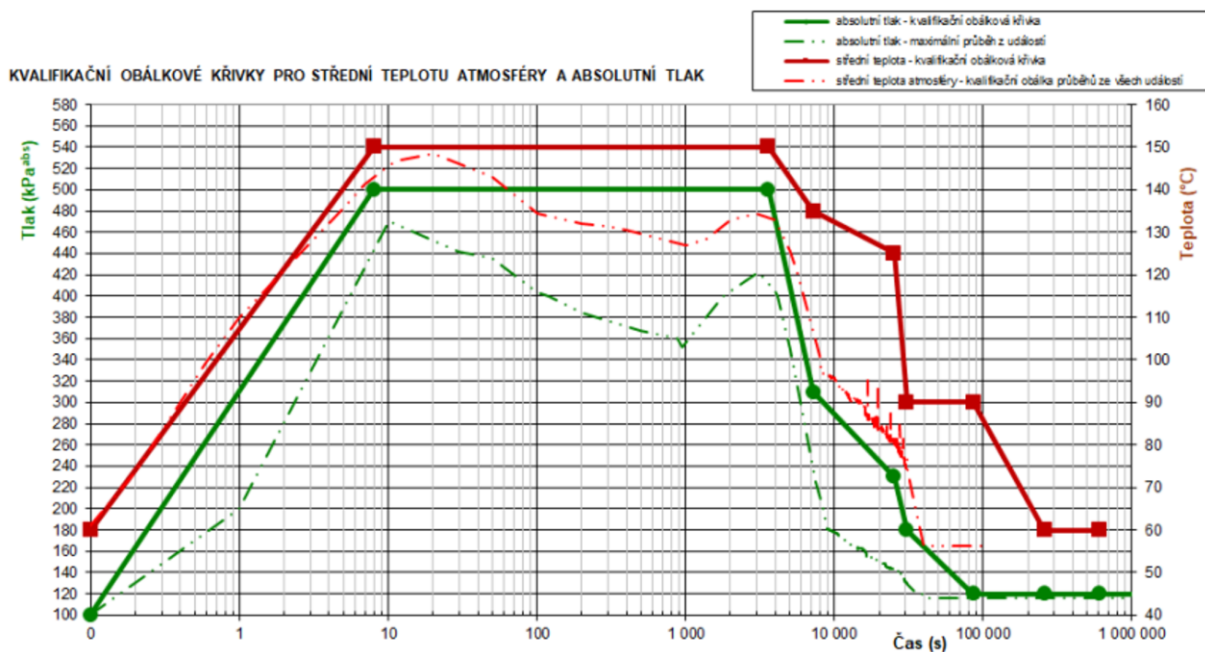
Obr. 4: Víko LOCA nádoby s nátrubky

### Teplotně-tlakové profily LOCA havárií

Parotlakový profil LOCA simulace je dán výpočty pro konkrétní jadernou elektrárnu (obr. 5). Tento profil se liší podle typu JE. Obvykle sestává z několika fází (tabulka 1) – temperace vzorků na provozní teplotě (odpovídá danému místu jejich reálné instalace na JE), následované teplotně-tlakovým šokem růstem parametrů na jejich maximální předepsané hodnoty a dále přechodem na stabilní fázi výdrže na maximálních parametrech a dále jejich postupným poklesem. Poté mohou následovat ještě další 1-2 píky s následným poklesem parametrů a konečným chladnutím nádoby, které se děje buď přirozeně, nebo může být urychlováno.

Tab. 1: Obecné rozsahy běžně simulovaných LOCA profilů

FÁZE	TEPLOTA [°C]	PŘETLAK [bar]		ČAS
Instalace vzorků a měření	-	-		-
Temperace	30-80	0		30-60 minut
Pík	232	7		sekundy (ideálně)
Sprchování	-	-		hodiny, dny
2., 3. peak	různé	různé		různé
Pokles	180→160→100→...	různé		minuty, hodiny, dny
Chladnutí	volné/zrychlené	0		hodiny
Vyjmutí a inspekce vzorků	-	-		-



Obr. 5: Příklad předepsaného LOCA profilu pro JE



## **TERMOMECHANICKÉ HODNOCENÍ TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU BĚHEM TĚŽKÉ HAVÁRIE – URČENÍ MATERIÁLOVÝCH VSTUPNÍCH DAT A JEJICH POUŽITÍ V SIMULACÍCH**

### **THERMOMECHANICAL EVALUATION OF THE REACTOR PRESSURE VESSEL DURING A SEVERE ACCIDENT – DETERMINATION OF MATERIAL INPUT DATA AND THEIR APPLICATION SIMULATIONS**

Petr Gál <sup>a)</sup>, Miroslav Kotouč <sup>a)</sup>, Petr Dymáček <sup>b)</sup>, Dušan Gabriel <sup>c)</sup> a Vladislav Pištora <sup>a)</sup>

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

<sup>b)</sup> Akademie věd České republiky, Ústav fyziky materiálů

<sup>c)</sup> Akademie věd České republiky, Ústav termomechaniky

#### **Abstrakt**

Teplotní a strukturální analýza tlakové nádoby reaktoru (TNR) VVER 1000 v průběhu těžké havárie (TH) je analyzována za vysokých teplot způsobených tavením paliva. Pro provedení takových analýz jsou nutné materiálové vstupní údaje až téměř do teploty tavení materiálu TNR. Jedná se především o termo-mechanické parametry a charakteristiky materiálu v tečení (creepu). Následně je provedena analýza zvoleného scénáře havárie, a to pomocí termo-hydraulického kódu pro získání zatěžujících podmínek (tepelné toky). Tyto podmínky jsou dále použity jako vstupní zatěžující údaje pro detailní hodnocení TNR pomocí MKP výpočtu. V MKP simulaci je zohledněna terciální fáze tečení (creepu).

#### **Abstract**

Thermal and creep analysis of the VVER-1000 reactor pressure vessel (RPV) was performed at high temperatures caused by fuel melting during severe accident. Material input data up to almost the melting point of the TNR material is required to perform such analyses. These are mainly thermo-mechanical parameters and creep characteristics of the material. Subsequently, an analysis of the selected accident scenario is performed using a thermo-hydraulic code to obtain the loading conditions (mainly heat fluxes). These conditions are further used as input loading data for the detailed evaluation of the RPV by FEM calculation. The tertiary creep phase is taken into account in the FEM simulation.

#### **Úvod**

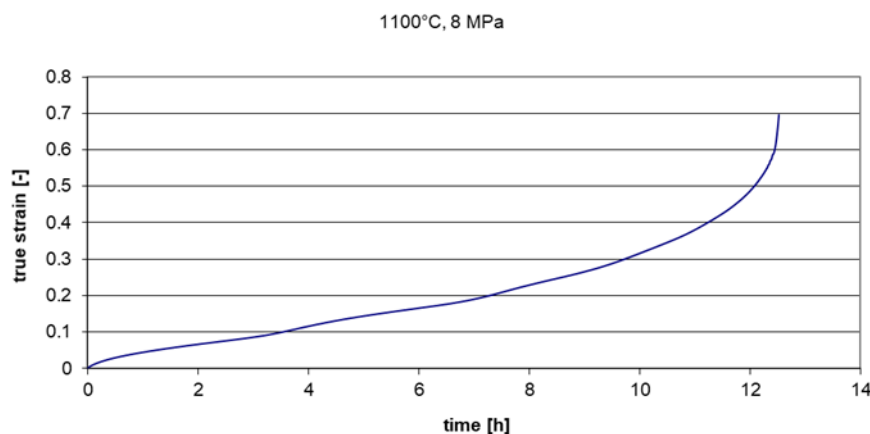
Předmětem této práce je numerická analýza tlakové nádoby reaktoru VVER-1000 (TNR) při hypotetické těžké havárii (SA), která předpokládá, že v důsledku nedostatečného chlazení aktivní zóny reaktoru dojde k roztavení vnitřních částí reaktoru, a to včetně palivových článků. Cílem analýzy je výpočetně posoudit tento havarijní stav s ohledem na dosažení vysokých teplot a uplatnění tečení materiálu (creepu) a na tomto základě navrhnout obecnou metodiku hodnocení integrity RPV při vysokých teplotách v důsledku tavení paliva během těžké havárie. Pro provedení takového hodnocení je tedy postup rozdělen na:

- materiálové charakteristiky TNR,
- termo-hydraulické výpočty pro získání okrajových podmínek pro detailní hodnocení nádoby reaktoru,
- výpočty pomocí metody konečných prvků se zahrnutím creepového chování materiálu.

## Materiálové charakteristiky TNR

Stanovení tepelně-fyzikálních a mechanických vlastností materiálu oceli TNR 15Ch2NMFA-A používané v jaderné elektrárně VVER-1000 při pokojových a vysokých teplotách je klíčovým úkolem nezbytným pro simulaci případných scénářů těžkých havárií, jako je akutní ztráta chladiva (LOCA), která může vést k roztavení vnitřních částí reaktoru. Tyto vlastnosti slouží spolu s geometrií TNR (hlavně dna TNR) a okrajovými podmínkami jako vstupní údaje pro termo-hydraulické výpočty a následné modelování napětí a deformace metodou konečných prvků.

Klíčovými tepelně-fyzikálními vlastnostmi, které je třeba získat, jsou hustota, součinitel tepelné roztažnosti, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a měrné teplo tání. Mechanickými vlastnostmi jsou myšleny modul pružnosti (Youngův modul), modul pružnosti ve smyku, Poissonovo číslo, tahové vlastnosti reprezentované napětově-deformačními křivkami, z nichž lze získat mez pevnosti v tahu, mez kluzu a tažnost ale především creepové vlastnosti reprezentované creepovými křivkami v rozsahu teplot 500 °C až 1000 °C pro různé hladiny zatížení [1]. Creepové křivky byly měřeny v tahu i tlaku. Creepová křivka při 1100 °C a zatížení 8 MPa je vyobrazena na obr. 1.



Obr. 1: Creepová křivka při 1100 °C a napětové hladině 8 MPa

## Termo-hydraulické výpočty

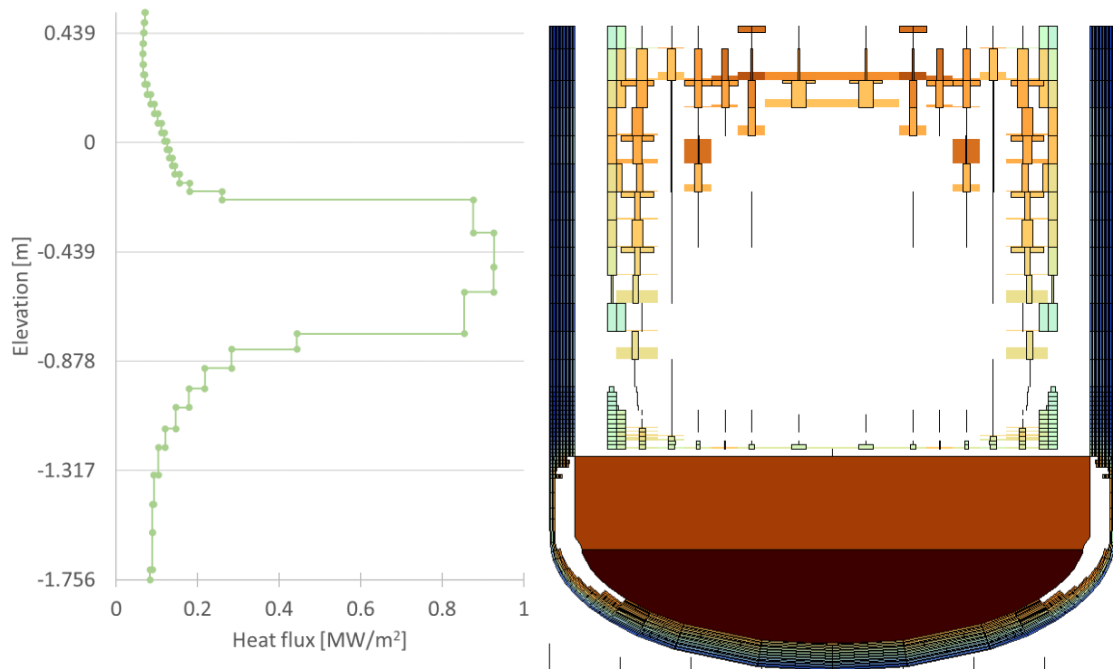
Pro získání okrajových podmínek pro následné strukturální analýzy pomocí MKP, byl použit integrální kód pro analýzy SA ASTEC (vyvinutý IRSN, Francie). Kód ASTEC je typu "lumped parameter" (LP), což znamená, že prostorová diskretizace výpočetní oblasti je poměrně hrubá – velké uzly jsou použity k reprezentaci částí jádra a vnitřních částí reaktoru, primárního/sekundárního okruhu a kontejnmentu. Díky této relativně hrubé reprezentaci elektrárny je kód ASTEC schopen simulovat vývoj těžké havárie (TH) od iniciační události až po hypotetický únik radioaktivity do životního prostředí.

Pomocí kódu ASTEC byly analyzovány dva scénáře TH, iniciované velkou ztrátou chladiva (LOCA) a výpadkem napájení (SBO). Uvažovanou referenční elektrárnou byla česká JE Temelín, vybavená dvěma bloky VVER-1000/320. Obě sekvence TH byly spuštěny s uvažováním strategie udržení taveniny v nádobě (IVMR), která spočívá v externím chlazení TNR na vnějším povrchu, ale také bez vnějšího chlazení, kdy se předpokládá protavení TNR. Celkem tedy byly hodnoceny 4 kvalitativně odlišné sekvence TH.

Příklad charakteristických výsledků získaných z analýzy pomocí kódu ASTEC pro scénář LOCA s uvažováním použitím strategie IVMR je uveden na obr. 2. Levá část zobrazuje pozdní fázi průběhu havárie, kdy je většina taveniny relokována do dna TNR a nastalo vytvoření dvouvrstvého bazénu taveniny. Z obrázku je patrné silné odtavení stěny TNR. Na obr. 2 vpravo je



zobrazen průběh tepelného toku od pólu dna TNR. Hodnota tepelného toku v čase 23 600s dosahuje  $930 \text{ kW/m}^2$ .



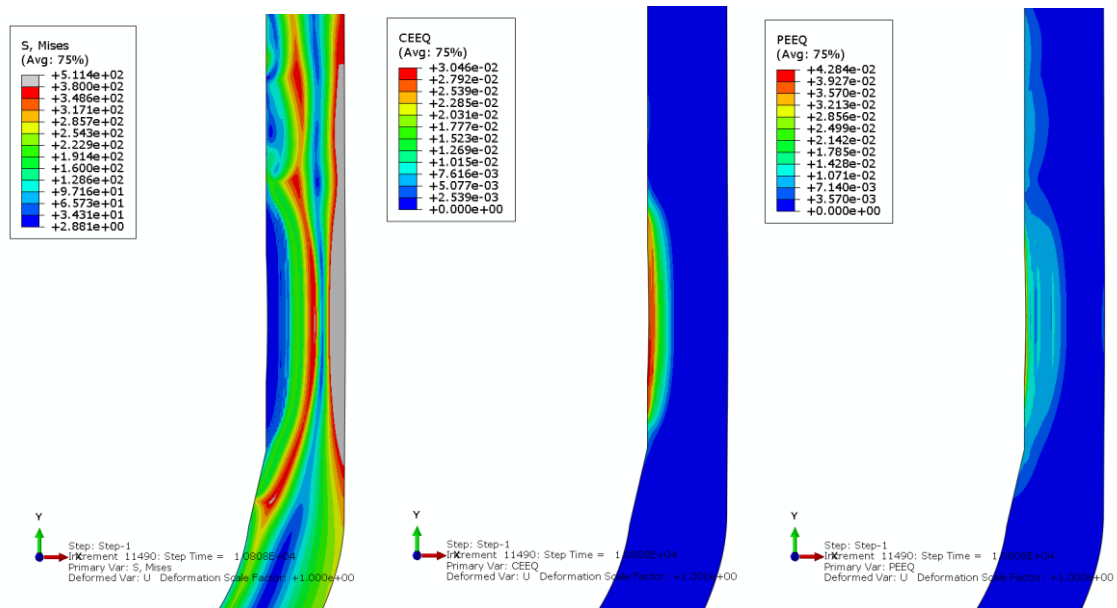
Obr. 2: Stav vnitřních částí reaktoru a odtavená profil TNR (vlevo) a profil tepelného toku v závislosti na axiální souřadnici TNR v čase 23 600 s (vpravo)

### MKP výpočty

MKP výpočet byl řešen jako osově symetrický, což umožňuje detailní analýzu v předpokládané oblasti tavení TNR, kde je předpokládáno dosažení vysokých teplot. Stejně jako při řešení termo-hydraulických výpočtů, byla řešena referenční elektrárna VVER 1000 Temelín. Jako vstupní okrajové podmínky z termo-hydraulických výpočtů byly převzaty hodnoty tlaků, hmotnost taveniny ale hlavně hustota tepelného toku mezi taveninou a vnitřním povrchem TNR. Vstupní materiálová data byla použita z experimentálního měření. Vysoké teploty a napětí bude dosaženo v relativně krátkém časovém okamžiku, a proto se jeví jako vhodné použití komplexního creepového modelu, který zohledňuje sekundární i terciální fázi creepu (tečení). Tuto podmínku dobře splňuje zavedený creepový exponenciální model s poškozením vyvinutý V. Bínou a kolektivem [2]. Na základě provedených experimentálních testů byl komplexní creepový model naladěn pro použití v MKP simulacích.

Kromě zohlednění creepové deformace je v modelu zahrnuta plastická složka deformace. Pro popis plastické deformace bylo zvoleno izotropní lineární pravidlo zpevnění. Dále je ve výpočtu zohledněno tavení TNR v místě, kde nastane překročení teploty tavení materiálu.

Na obr. 3 jsou uvedeny rozložení polí napjatosti, creepové a plastické deformace pro scénář LOCA s uvažováním strategie IVMR v čase 10 808 s. Je patrné, že creepová deformace dosahuje 3 % na vnitřním povrchu TNR. Hodnota plastické složky dosahuje 4,3 % a to ve stejném místě jako creepová složka. V tomto časovém úseku již dochází k odtavování materiálu na vnitřním povrchu TNR.



Obr. 3: Rozložení napětíového pole (levý obrázek), creepové deformace (prostřední obrázek) a plastické deformace (pravý obrázek) v čase 10 800 s

### Poděkování

Práce byla podpořena Technologickou agenturou České republiky grantem č. TITSSUJB938 „Metoda hodnocení integrity tlakové nádoby reaktoru JE VVER-1000 při těžké havárii spojené s tavením jaderného paliva“.

### Literatura

- [1] DYMÁČEK, P., ZOBAČ, O., CHLUP, Z., POHANKA, M., GABRIEL, D., GÁL, P. Determination of material properties for the evaluation of VVER-1000 reactor pressure vessel integrity during severe accident with core meltdown, *New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts*. Ostrava, 12-16 September 2022.
- [2] BÍNA, V., HAKL, J. Probabilistic approach to description of the creep strain characteristic and prediction for long life-time. In: *Conference Materials for Advanced Power Engineering*. Boston (Dordrecht): Kluwer Academic Publishers, 1994, p. 601-610.

## ODOLNOST A KOROZNÍ CHOVÁNÍ SLITINY 800H SE SVAREM VE VYSOKOTEPLTNÍM HELIU

### RESISTANCE AND CORROSION BEHAVIOR OF ALLOY 800H WITH WELD IN HIGH TEMPERATURE HELIUM

Tereza Bartíková<sup>a)</sup>, Jan Procházka<sup>a)</sup> a Jan Berka<sup>a, b)</sup>

<sup>a)</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec

<sup>b)</sup> Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6

#### Abstrakt

Korozní vzorky slitiny 800H s TIG svarem plněným Nicroferem byly vystaveny působení nečistého helia ve vysokoteplotní peci (HTF) při 760 °C po dobu 372, 1000 a 1500 hodin. Nečistoty byly vybrány pro simulaci podmínek v systému vysokoteplotního plynového reaktoru. Tloušťka a složení korozní vrstvy byly hodnoceny skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM). Lokalizované korozní napadení bylo nalezeno po 1500 hodinách mezi svarovým kovem a základním materiálem. Bylo zjištěno, že slitina 800H a slitina Nicrofer degradují podobně v oxidačním prostředí.

#### Abstract

Corrosion specimens of Nicrofer-filled TIG-welded 800H alloy were exposed to impure helium in a high-temperature furnace (HTF) at 760°C for 372, 1000, and 1500 hours. The impurities were selected to simulate conditions in a high-temperature gas reactor system. The thickness and composition of the corrosion layer were evaluated with a scanning electron microscope (SEM). A localized corrosion attack was found after 1500 hours between the weld metal and the base material. In an oxidizing atmosphere, alloy 800H and Nicrofer alloy degraded equally.

#### Úvod

Plynem chlazené reaktory byly vyvíjeny a konstruovány od 50. let 20. století. První typ byl vyvinut ve Velké Británii, pracoval s přírodním uranem a jako chladicí médium používal oxid uhličitý. Následující typy plynem chlazených reaktorů jsou známé jako vysokoteplotní reaktory (HTR a HTGR) a jejich chladivem je helium. Tyto reaktory byly navrženy a postaveny v USA a Německu [1]. Mezinárodní fórum IV. generace vybralo šest slibných jaderných energetických technologií pro pokračující výzkum a vývoj. Dva kandidáti jsou plynem chlazené reaktory (GCR), zejména velmi vysokoteplotní reaktor (VHTR) a plynem chlazený rychlý reaktor (GFR) [2].

Materiály pro aplikaci v plynem chlazených reaktorech byly zkoumány především v 70. a 80. letech 20. století. Vysoká teplota, tlak a průtok chladicí kapaliny zvyšují nároky na stavební materiály, které musí být odolné vůči korozi a zároveň mechanicky odolné. Při konstrukci tepelně namáhaných součástí plynem chlazených reaktorů se používají vysokoteplotní oceli a speciální slitiny [2, 3]. Slitina 800H byla použita při několika příležitostech kvůli její pevnosti při vysokých teplotách a odolnosti vůči vysokoteplotní korozi. Tato slitina na bázi železa s obsahem uhlíku v rozmezí 0,05–0,10 % hmotnostních a obsahem hliníku a titanu v rozmezí 0,30–1,20 % hmotnostních je vhodná a certifikovaná pro použití v jaderných systémech při teplotě do 760 °C [4–6]. Korozní chování slitin v chladivu helia je závislé na vytvoření kompaktní a pomalu rostoucí vrstvy oxidu na povrchu, tento oxid brání další degradaci materiálu [2]. Odolnost proti korozi byla testována v nečistém heliu při teplotě 760 °C po dobu až 1500 hodin.

## Experimentální část

Vzorky slitiny 800H použité pro experimenty byly připraveny pomocí TIG svarů plněných Nicroferem. Byly připraveny dvě sady vzorků, první sada ze slitiny 800H bez svaru a druhá sada ze slitiny 800H se svarem. Korozní kupóny obsahovaly, jak svarový spoj, tak tepelně ovlivněnou zónu. Na vzorcích bylo provedeno rekrytalizační žíhání. Rozměry testovaných vzorků byly 40 x 10 x 2 mm. Chemické složení materiálů je uvedeno v tabulce 1. Povrch analyzované plochy byl před expozicí upraven brusným papírem o zrnitosti 500  $\mu\text{m}$ . Následně byly vzorky vyčištěny ultrazvukem, vysušeny a zváženy.

Tab. 1: Chemické složení slitiny 800H a svarového kovu Nicrofer [Wt%]

	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	W	Co	Nb	Al	Fe
<b>800H</b>	0.06	0.7	0.5	0.1	30.5	20.5	<0.001	<0.001	0.34	<0.001	0.1	0.01	0.28	46.7
<b>Nicrofer</b>	<0.01	3.2	0.11	0.01	72.9	20.4	<0.001	<0.001	0.32	<0.001	<0.001	2.7	<0.001	0.2

Poté byly vzorky vystaveny exponovány po dobu až 1500 hodin ve vysokoteplotní peci (HTF). Teplota během experimentu byla 760 °C a tlak 0,9 MPa. Průtok plynu byl cca. 0,1 l/min. Složení plynné směsi použité jako korozní atmosféra pro expozici vzorků je uvedeno v tabulce 2.

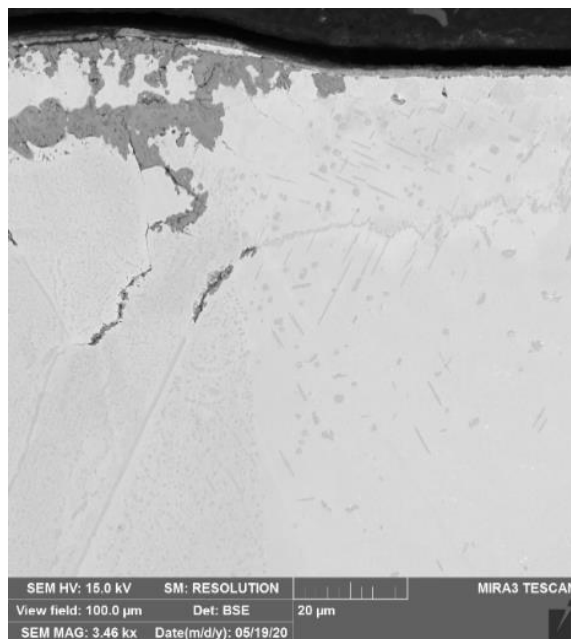
Tab. 2: Chemické složení plynné směsi

Složka	Koncentrace (obj. %)	Parciální tlak (Pa)
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,01	80
<b>CO</b>	0,05	400
<b>H<sub>2</sub></b>	0,01	80
<b>Helium</b>	Bal.	Bal.

Po expozici byly vzorky znovu zváženy na analytických vahách s přesností 0,00001 g. Analytické metody využitě k vyhodnocení mikrostruktury před a po expozici (na povrchu vzorku a v příčném řezu na metalografickém výbrusu) byly skenovací mikroskop SEM TESCAN Lyra3 GMU vybavený autoemisní katodou (FEG), v režimu zobrazení pomocí sekundárních elektronů (SE) a zpětně odražených elektronů (BSE). Mikroskop je vybaven energiově disperzním detektorem (EDS) k určení chemické analýzy.

## Výsledky a diskuse

SEM snímky příčných řezů vzorků v počátečním stavu a po expozici jsou znázorněny na obr. 1 až obr. 3. Exponováním vzorků došlo ke zhrubnutí zrn základního kovu a tepelně ovlivněné zóny. Difuzivita Cr na hranicích zrn je podstatně vyšší než skrz zrna, velikost zrna slitiny hraje zásadní roli při dodávání Cr na rozhraní kov/oxid [7]. Během expozice došlo k vytváření povrchové ochranné vrstvy oxidů na povrchu slitiny a zároveň SEM analýza vzorku prokázala lokalizovanou hlubokou oxidaci mezi svarovým kovem a základním materiálem. Docházelo k pronikání Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do materiálu po hranicích zrn (viz obr. 3). Na povrchu vzorků byla objevena ochranná oxidová vrstva o tloušťce až 3  $\mu\text{m}$ . Podle EDS analýz byla vrstva oxidu z velké části tvořena Cr, O<sub>2</sub> a stopovým množstvím Mn. Aby se minimalizovala degradace těžkými korozními procesy ve slitinách používaných při vysokých teplotách, je nezbytné vytvořit ochrannou vrstvu Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Je známo, že minimální koncentrace Cr kolem 20 hmotnostních % je vyžadována pro vytvoření ochranného, souvislého povlaku na slitinách Fe-Cr a slitinách niklu, který brání dalšímu napadení [8].



Obr. 1: Výchozí stav



Obr. 2: Exponovaný vzorek po 1500 hodinách

V některých případech bylo pozorováno odlupování korozní vrstvy. Jak slitina 800H, tak slitina Nicrofer degradovaly stejným způsobem (viz tabulka 3). Nárůst hmotnosti i nárůst tloušťky vrstvy oxidů vykazoval parabolické chování u testovaných slitin.

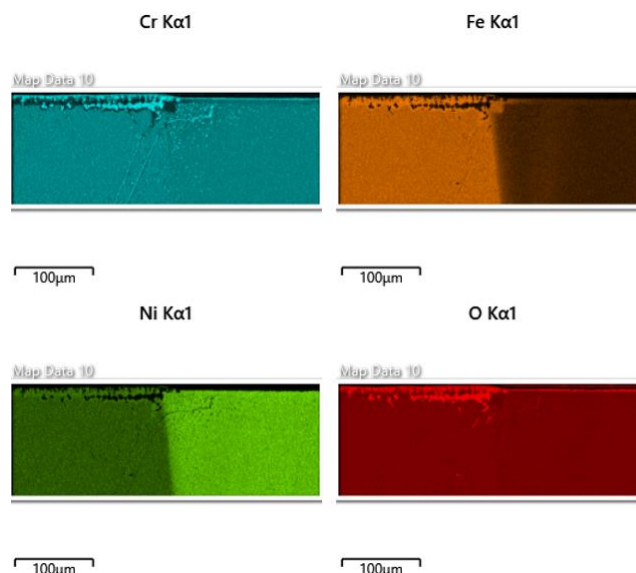


Tab. 3: Tloušťka oxidické vrstvy

Expozice	Tloušťka korozní vrstvy (μm)		
	800H	Nicrofer	HAZ
760 °C/372 h	1,95	1,80	2,42
760 °C/1000 h	2,23	2,20	2,97
760 °C/1500 h	2,51	2,45	3,10



Obr. 3: Lokalizovaná oxidace po hranicích zrn



Obr. 4: EDS analýza hranice tepelně ovlivněné zóny (HAZ) a svarového kovu (WM) slitiny

Ačkoli nečisté helium prošlo molekulárním filtrem, obsah vlhkosti v přiváděném plynu byl kolem 10 obj. ppm během experimentu, což může zapříčinit vznik vnitřní koroze, protože vodní pára převažuje nad jinými procesy, jako je nauhličování a oduhličování. Hluboká vnitřní oxidace může způsobit vznik únavových a creepových lomů [2].

## Závěr

Na základě minulých vědeckých výsledků byla slitina 800H vybrána jako nejlepší materiál pro myšlenku systému HTGR. Vzorčky základního kovu slitiny 800H a vzorčky základního kovu 800H se svarovým kovem byly vystaveny prostředí nečistého helia po dobu až 1500 hodin při 760 °C.

- Na povrchu vzorků byla detekována ochranná oxidová vrstva o tloušťce až 3 μm, která rostla s dobou expozice. Korozní vrstva byla většinou složena z Cr, O<sub>2</sub> a stopového množství Mn. V některých situacích bylo zjištěno odlupování korozních vrstev.
- Zrna základního materiálu a tepelně ovlivněná zóna zhrubly časem a teplotou.
- Po 1500 hodinách byla objevena lokalizovaná hluboká oxidace mezi svarem a základním materiálem.
- Slitina 800H i slitina Nicrofer degradovaly identicky.

## Poděkování

Práce vznikla v rámci projektu podporovaným TAČR. č. TK02030024 „Stabilita a odolnost materiálů okruhů s vysokoteplotním héliem“.

Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

## Literatura

- [1] WRIGHT, R. - WRIGHT, J. - CABET, C. 5.11 - Material performance in helium-cooled systems. *Comprehensive Nuclear Materials*, Elsevier, 2012, vol. 5, p. 251-277.
- [2] CABET, C. - TERLAIN, A. - LETT, P. - GUÉTAZ, L. - GENTZBITTEL, J-M. High temperature corrosion of structural materials under gas - cooled reactor helium. *Materials and Corrosion*, 2006, vol. 57, p. 147-153
- [3] BARTÍKOVÁ, T. *Resistance and corrosion of alloys in high temperature helium environment*. VŠCHT Praha, Praha, 2020, bakalářská práce.
- [4] GUZONAS, D. - EDWARDS, M. - ZHENG, W. Assessment of candidate fuel cladding alloys for the Canadian supercritical water-cooled reactor concept. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2016, vol. 2, no. 1. Available on: <https://doi.org/10.1115/1.4031502>
- [5] INCOLOY ALLOY 800H: Iron nickel chromium alloy for high-temperature uses alloy. *Digest 1*. January 1978; vol. 27, no. 1, SS–347. Available on: <https://doi.org/10.31399/asm.ad.ss0347>
- [6] NATESAN, K. - PUROHIT, A. - TAM, S.W. *Materials behavior in HTGR environments*. NUREG/CR-6824, ANL-02/37. 2003.
- [7] KAUR, I., GUST, W., *Fundamentals of grain and interphase boundary diffusion*. Ziegler Press, Stuttgart, 1988.
- [8] TRINDADE, V.B. - KRUPP, U. - WAGENHUBER, E-G. - YANG, S. - CHRIST, H.J. *The different role of alloy grain boundaries on the oxidation mechanisms of Cr-containing steels and Ni-base alloys at high temperatures*. In: *Novel Approaches to Improving High Temperature Corrosion Resistance*. Woodhead Publishing, 2008, p. 80-92, ISBN 9781845692384. Available on: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.03.054>



## VAV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV A NEDESTRUKTIVNÍCH METOD V ROCE 2022

### R&D PROJECTS IN CVR FOR SURFACE TREATMENTS AND NON – DESTRUCTIVE METHODS IN 2022

Jaroslav Brom, Jana Veselá, Michal Chocholoušek a Jan Patera

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

#### Abstrakt

V článku jsou uvedeny informace o výsledcích VaV projektů CVŘ řešených v roce 2022 v rámci projektu NCK pro energetiku, dílčího projektu DP28 “Materiály a diagnostika pro pokročilé energetické aplikace“, pracovního balíčku PB28.1 “Povrchové úpravy komponent v JE a KE“ a pracovního balíčku PB28.2 “Perspektivní diagnostické metody“. Jsou uvedeny hlavní výstupy projektů z ověření vlastností povlaků NiCr a Ni zhotovených technologií Cold Spray po aplikování únavových zkoušek (teplotní a nízko-cyklická) a vlastností povlaků NiCr při použití na opravy těsnících ploch. Dále jsou uvedeny výsledky z vývoje a ověření metodiky pro měření hlavního cirkulačního potrubí a přípojných potrubí až po první uzavírací armaturu JE Temelín metodou NEWS.

#### Abstract

The article provides information on the results of R&D projects of CVŘ solved in 2022 within the NCK project for energy, subproject DP28 "Materials and diagnostic for advanced energy applications", work package PB28.1 "Surface treatment of components in NPPs and FPPs" and package PB28.2 "Perspective diagnostic methods". The main outputs of the projects from the verification of the properties of NiCr and Ni coatings made by Cold Spray technology after the application of fatigue tests (thermal and low-cyclic) and the properties of NiCr coatings when used for repairs of sealing surfaces are presented. The results from the development and verification of the methodology for measuring the main circulation pipeline and connecting pipelines up to the first shut-off valve of the Temelín NPP using the NEWS method are also presented.

#### 1. Únavové zkoušky povlaků COLD SPRAY

Únavové zkoušky byly realizovány pro dva typy prášku – Ni a NiCr nastříkaných na substrátu z materiálu DIN EN 1.4541. Pro každý typ prášku byl zhotoven povlak Cold Spray (CS) o tloušťce 2,5 mm na desku o rozměrech 110 x 280 mm. Z každé desky bylo vyrobeno celkem 15 ks zkušebních těles o rozměrech 15 x 100 mm s tím, že 10 ks zkušebních těles bylo použito pro nízko-cyklické zkoušky a 5 ks pro zkoušky teplotní únavy. Program zkoušek vychází z [1].

##### 1.1 Nízko-cyklická únava

Nízko-cyklická únava byla provedena 4bodovým ohybem s roztečí podpěr 80 mm a roztečí trnů 40 mm v režimu řízeném silou se sinusovým průběhem. Realizovány byly dva způsoby zatěžování:

1. Hladina prvního způsobu zatěžování 4bodovým ohybem byla stanovena obdobně jako v [2]: asymetrie cyklu  $R=0,1$ ; maximální síla  $F_{max}$  byla stanovena jako 98 % meze kluzu ( $R_{p0,2}$ ) oceli substrátu (162 MPa), a maximální počet cyklů 50 000.
2. Hladina druhého způsobu zatěžování byla stanovena postupným cyklováním jednoho vzorku od každého prášku s krokem 20 MPa a stopovací podmínkou lom do 50 tisíc cyklů (NiCr do 460 MPa a Ni do 440 MPa) jako odhad pevnosti v ohybu CS vrstvy. Na základě postupného cyklování byla stanovena společná hladina  $\sigma_{max} = 400$  MPa;  $R=0,1$ . Stopovací podmínka byla stanovena na 100 000 cyklů.

Po vystavení nízko-cyklické únavě byla zkušební tělesa podrobena ultrazvukové kontrole a optickému hodnocení povrchu vzorků za účelem prokázání přítomnosti trhlin v povlaku i na rozhraní substrát-povlak. Výsledky metalografické analýzy zkušebních těles nebyly v době psaní článku dostupné, jejich vyhodnocení proběhne do konce roku 2022.

Výsledky zkoušek ukázaly, že při prvním způsobu zatěžování nedošlo k únavovému lomu ani k porušení CS vrstvy anebo k porušení rozhraní CS – substrát. Při druhém způsobu zatěžování se vyskytl únavový lom u zkušebních těles s CS povlakem z Ni prášku – viz tabulka 1 a obr. 1.

Tab. 1: Parametry a výsledky nízko-cyklických zkoušek

Označení	Tloušťka CS+Sub (mm)	Šířka (mm)	Délka (mm)	CS (mm)	L (mm)	$\sigma$ (MPa)	F (N)	Lom (tis. cyklů)		
Ni-111-06	19.1	15.0	100	2.5	80	158	14410	N/A		
Ni-111-07	19.1	15.0	100	2.5	80	158	14410	N/A		
Ni-111-08	19	15.0	100	2.5	80	158	14260	N/A		
Ni-111-09	19.1	15.0	100	2.5	80	158	14410	N/A		
Ni-111-10	19	15.0	100	2.5	80	158	14260	N/A		
Ni-111-11	19	15.0	100	2.5	80	440	39710	43	+50k a +20 MPa krok	
Ni-111-12	19	15.0	100	2.5	80	400	36100	N/A		
Ni-111-13	19	15.0	100	2.5	80	400	36100	64		
Ni-111-14	19	15.0	100	2.5	80	400	36100	43		
Ni-111-15	19.1	15.0	100	2.5	80	400	36481	48		
NiCr-211-06	18.8	15.0	100	2.5	80	158	13961	N/A		
NiCr-211-07	18.8	15.0	100	2.5	80	158	13961	N/A		
NiCr-211-08	18.9	15.0	100	2.5	80	158	14110	N/A		
NiCr-211-09	18.8	15.0	100	2.5	80	158	13961	N/A		
NiCr-211-10	18.8	15.0	100	2.5	80	158	13961	N/A		
NiCr-211-11	18.8	15.0	100	2.5	80	460	40646	37	+50k a +20 MPa krok	
NiCr-211-12	18.8	15.0	100	2.5	80	400	35344	N/A		
NiCr-211-13	18.8	14.9	100	2.5	80	400	35108	N/A		
NiCr-211-14	18.9	14.9	100	2.5	80	400	35483	N/A		
NiCr-211-15	18.9	14.9	100	2.5	80	400	35483	N/A		

CS je tloušťka vrstvy povlaku, L je rozteč podpor při 4bodovém ohybu (poměr rozteče trnů a podpor je 1:2),  $\sigma$  je max. zatěžovací napětí, F je max. zatěžovací síla. U vzorků s popisem lomu N/A nedošlo do 50 (resp. 100) tisíc cyklů k porušení.



Obr. 1: Fotografie zkušebního tělesa s povlakem z Ni prášku s lomem a odtržením povlaku na jeho rozhraní se substrátem

## 1.2 Teplotní únava

Teplotní cyklování bylo realizováno ohřátím zkušebních těles na teplotu 320 °C s následným ochlazením do vody, celkem pro 30 cyklů. Zkoušky na ověření stavu povlaku po vystavení teplotní únavě byly stejné jako v předchozím případě, tj. ultrazvukové zkoušení, optické hodnocení a metalografická analýza. Zkušební tělesa s CS povlakem z NiCr prášku vykazovala viditelné odlupování vrstvy povlaku již po prvním cyklu. U zkušebních těles s CS povlakem



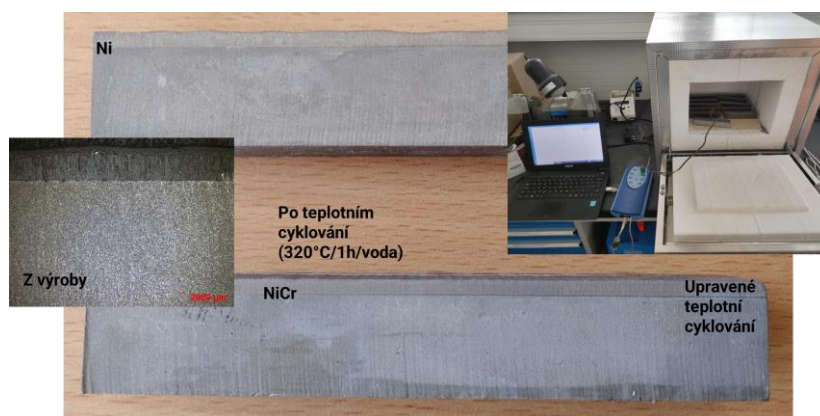
z Ni prášku bylo odloupení opticky pozorovatelné až po 30 cyklech. Nízká odolnost materiálu proti teplotnímu cyklování je přisuzována vysokým vnitřním napětím, která souvisí s vysokou pevností a nízkou tažností CS zvolených povlaků [3]. Tento předpoklad je nutno dále ověřit měřeními zbytkového napětí vrstev deponovaných technologií CS.

Protože vzorky únavově zatěžované na hladině  $\sigma_{\max}$  158 MPa nevykazovaly žádné porušení, byly tyto vzorky použity pro doplňující tepelné cyklování. Pro zmírnění vlivu vnitřního napětí bylo na těchto vzorcích před realizací teplotního cyklování provedeno tepelné zpracování [4, 5] (390 °C, 120 hodin, vzduch), které bylo stanoveno s ohledem na maximální dovolené teploty pro potenciální aplikace v energetickém průmyslu a na základě předchozích zkušeností s Ni a NiCr povlaky. Podmínky doplňkového teplotního cyklování byly dohodnuty s partnerem projektu, ČEZ, a.s., tak, aby se co nejvíce přiblížily provozním podmínkám na sekundárním okruhu JE Temelín:

1. náhřev trendem 10 °C/hod na 170 °C s 1hodinovou výdrží na teplotě pro ustálení,
2. náhřev na teplotu 270 °C větším trendem pro dosažení cílové teploty do cca 30 min,
3. vychladnutí vzorků na pokojovou teplotu, přirozeně na vzduchu,
4. opakování výše uvedených kroků, celkem 10 cyklů.

U celé vsázky byl jeden vzorek osazen termočlánkem pro zaznamenání průběhu teplot.

Na žádném z testovaných zkušebních těles nebylo po provedení 10 teplotních cyklů zaznamenáno viditelné poškození – viz obr. 2.



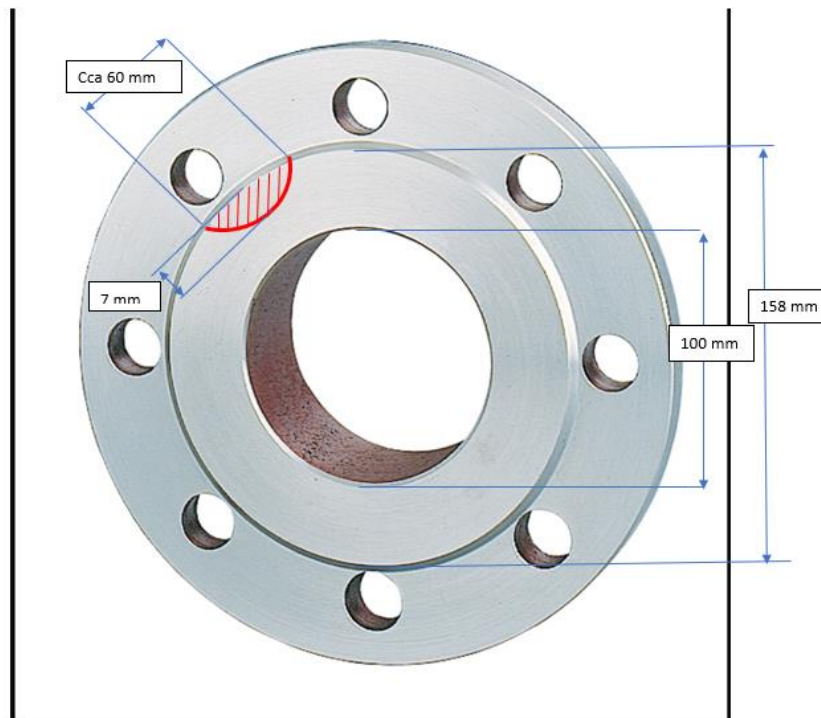
Obr. 2: Stav zkušebních těles s CS povlakem z prášku Ni a NiCr po realizování teplotní únavy

Výsledky metalografické analýzy zkušebních těles po teplotních únavových zkouškách nebyly v době psaní článku dostupné, jejich vyhodnocení proběhne do konce roku 2022.

## 2. Projekt oprav těsnících ploch technologií CS

Po dohodě s partnerem projektu firmou ČEZ, a.s. bylo dohodnuto, že pro opravu povrchu těsnících ploch lze používat prášek NiCr. Z důvodu, že ověření materiálových vlastností povlaku NiCr zhotoveného metodou CS bylo předmětem výstupů v předchozích VaV projektech v NCK 2019 až 2020 a NCK 2021, je program VaV projektu pro opravy těsnících ploch zaměřen na (viz [2]):

1. Stanovení přilnavosti povlaku CS z prášku NiCr v tahu bez použití lepidel. Jako substrát je použita ocel 1.4541.
2. Ověření těsnosti příruby po její opravě technologií CS povlakem z prášku NiCr. Jako substrát je použita slepá příruba, EN 1092-1 z materiálu P265GH, která se používá na JE Temelín. Rozměry vady opravované technologií Cold Spray jsou 60 x 7 x 2 mm (délka x šířka x hloubka) - viz obr. 3.
3. Ověření stavu rozhraní substrát – CS povlak pomocí ultrazvukového zkoušení a metalografické analýzy příruby po těsnostní zkoušce.



Šířka těsnící plochy: 14,5 mm

Rozměr vady:

- Hloubka 2 mm
- Šířka vady – ½ polovina těsnící plochy – 7 mm

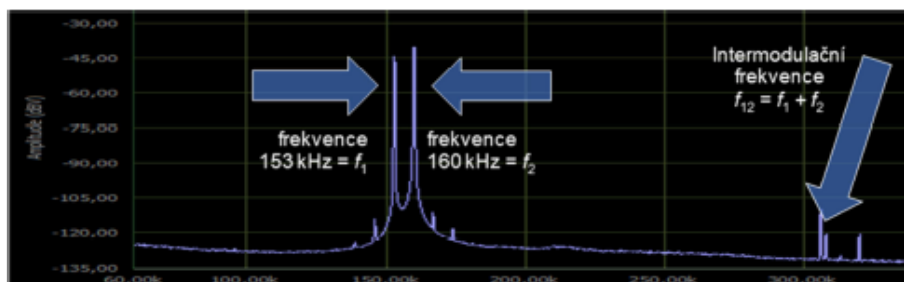
Obr. 3: Rozměry imitované vady slepé příruby, která bude opravena technologií Cold Spray

V době psaní článku byla příruba připravena ke zhotovení CS povlaku. Výsledky všech zkoušek budou k dispozici ke konci roku 2022.

### 3. Metodika pro měření hlavního cirkulačního potrubí a přípojných potrubí až po první uzavírací armaturu JE Temelín metodou NEWS

Účelem měření dle vyvíjené metodiky pro měření hlavního cirkulačního potrubí a přípojných potrubí až po první uzavírací armaturu JE Temelín metodou NEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) je monitorování vybraných tras primárního okruhu s cílem detekce trhlin, které se nachází mezi budiči a přijímači ultrazvukových signálů.

Principem metody NEWS je směšování dvou různých budících signálů o frekvencích  $f_1$  a  $f_2$  uvnitř zkoušeného materiálu pomocí snímačů typu budič a sledování odezvy ve snímači typu přijímač. Při použití této metody se trhlina projevuje nelineárním chováním, vznikem intermodulačních frekvencí (zejména vyšších násobků)  $f_{12} = a \cdot f_1 \pm b \cdot f_2$ , kde frekvence  $f_1$  a  $f_2$  jsou budící frekvence – viz obr. 4.



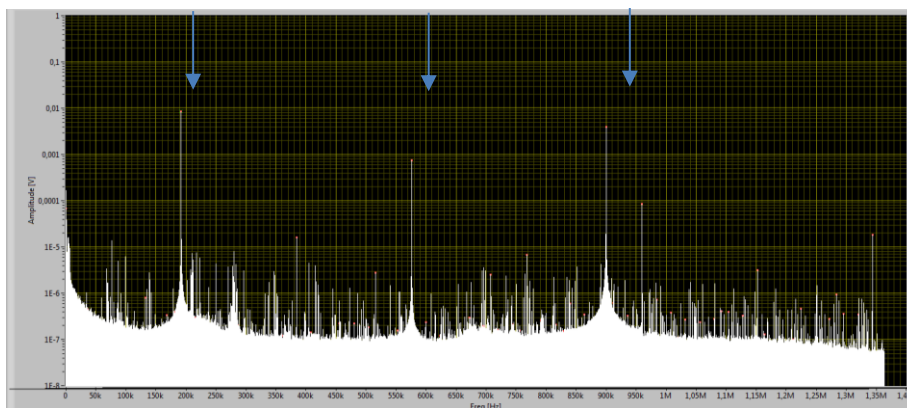
Obr. 4: Princip metody NEWS

V rámci předchozího vývoje se pro aplikace metody NEWS v potrubí ukázala jako nejvhodnější dvojice budících frekvencí  $f_1 = 192$  kHz,  $f_2 = 900$  kHz.

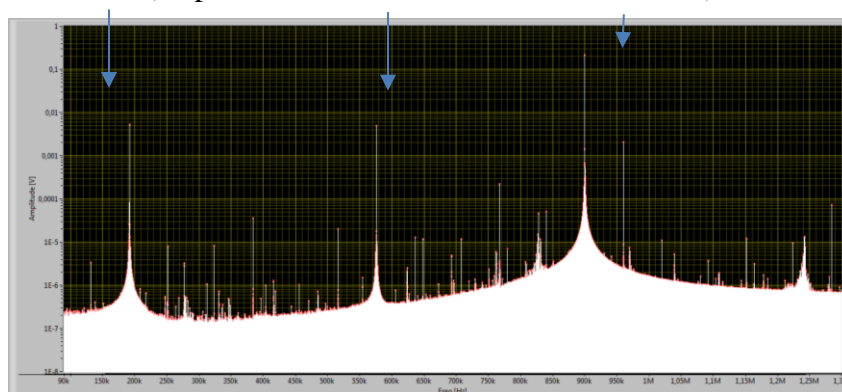
Vývoj a ověření metodiky v roce 2022 probíhá podle následujícího programu – viz [6]:

1. Laboratorní zkoušky na trubkových tělesech.
2. Měření potrubních tras primárního okruhu, na kterých jsou nainstalované snímače ACMS (Acoustic Crack monitoring System) na 1. bloku JE Temelín.
3. Měření potrubních tras primárního okruhu, na kterých jsou nainstalované snímače ACMS na 2. bloku JE Temelín a vybrané potrubní trase, kde jsou nainstalovány pouze snímače LEMOP.
4. Vypracování metodiky měření metodou NEWS včetně specifikací pro jednotlivé potrubní trasy.
5. Zpracování dokumentace (inspekčního postupu a technického zdůvodnění) pro certifikování metodiky partnerem projektu s využitím výstupů z předchozích VaV projektů z let 2019 až 2021.

V době tvorby článku byla realizována měření na 1. a 2. bloku JE Temelín a část laboratorních zkoušek. Z výsledků z měření na JE Temelín vyplynulo, že amplituda výstupních signálů na 1. bloku je řádově až  $100\times$  nižší oproti měření na 2. bloku – viz obr. 5 a obr. 6. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena rozdílnou konfigurací tras – rozdílným typem použitých koaxiálních kabelů a konektorů. Tento fakt vede k závěru, že metodiku bude možno v současné době vytvořit pouze pro 2. blok.



Obr. 5: Frekvenční spektrum trasy reaktor x hlavní cirkulační čerpadlo z 1. bloku JE Temelín (amplituda na frekvenci 900 kHz = 0,003 V)



Obr. 6: Frekvenční spektrum trasy reaktor x hlavní cirkulační čerpadlo z 2. bloku JE Temelín (amplituda na frekvenci 900 kHz = 0,2 V)

#### 4. Závěr

CVŘ řešilo v letech 2019 až 2022 problematiku použití technologie Cold Spray při opravách komponent JE a použití metody NEWS pro detekci trhlin v potrubí. Vývoj, který bude zakončen v roce 2022, ukázal následující:

- Technologie CS se ukazuje jako perspektivní opravárenská technologie. Výhodou této technologie je, že nevytváří v substrátu tepelně ovlivněnou zónu, povlak má nízkou pórovitost a je dobře prozvučitelný pro zkoušení metodou UT. Tato technologie může být použita při zhotovování vnějších ochranných vrstev, vnitřních ochranných vrstev jako např. u heterogenních svarových spojů, pro opravy těsnících ploch (po ověření popsaném výše), pro doplňování materiálu apod.
- Metoda NEWS je použitelná na detekci trhlin v potrubí s homogenními svary. V případě JE Temelín ji lze aplikovat na 2. bloku na potrubí osazené snímači systému ACMS.

#### Literatura

- [1] BROM, Jaroslav, CHOCHOLOUŠEK, Michal a ŠPIRIT, Zbyněk. NCK PB28.1 E28.2.3 – Program na ověření materiálových vlastností materiálu povlaků COLD SPRAY po aplikování únavových zkoušek a vlastností povlaků COLD SPRAY při opravách těsnících ploch. Centrum výzkumu Řež s.r.o., červenec 2022, technická zpráva, PL4341.
- [2] PARSI, Arash, LAREAU, Jack, GABRIEL, Brian and CHAMPAGNE, Victor. Cold Spray Coatings for Prevention and Mitigation of Stress Corrosion Cracking; [online]. 2017 [cit. 2023-09-27]. Available on: <https://dokumen.tips/documents/arash-parisi-westinghouse.html?page=8>
- [3] CAVALIERE, P. - SILVELLO, A. - CINCA, N. - CANALES, H. - DOSTA, S. - GARCIA CANO, I. - GUILMANY, J. M. Microstructural and fatigue behavior of cold sprayed Ni-based superalloys coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2017, vol. 324, p. 390-402.
- [4] ROKNI, M. R. - WIDENER, C. A. - OZDEMIR, O. C. - CRAWFORD, G. A. Microstructure and mechanical properties of cold sprayed 6061 Al in As-sprayed and heat treated condition. *Surface & Coatings Technology*, 2017, vol. 309, p. 641-650.
- [5] MURRAY, J. W. - ZUCCOLI, M. V. - HUSSAIN, T. Heat Treatment of Cold-Sprayed C355 Al for Re-pair: Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, p. 159-168, <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0665-z>
- [6] BROM Jaroslav a PATERA, Jan. NCK-DP28.2 E28.2.1 – Požadavky pro Vývoj a ověření metodiky pro měření hlavního cirkulačního potrubí a přípojných potrubí až po první uzavírací armaturu JE Temelín metodou NEWS, rev. 0. Centrum výzkumu Řež s.r.o., únor 2022, technická zpráva, PL4340.

# STANOVENÍ VLIVU GEOMETRIE VZORKU NA ROZVOJ CREEPOVÉ DEFORMACE POMOCÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE

## EVALUATION OF SAMPLE GEOMETRY EFFECT ON CREEP DEFORMATION PROGRESS USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

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

<sup>a)</sup> Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Žižkova 22, 616 62 Brno

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

<sup>c)</sup> ZD Rperty-Dakel, Ohrobecká 408/3, 142 00 Praha 4

### Abstrakt

Tato práce se zabývá stanovením vlivu geometrie tělesa na vývoj porušení v průběhu creepové expozice. Creepové testy byly provedeny při teplotě 600 °C a napětí 180 MPa v režimu ochranné atmosféry argonu. Pro zkušební testy byl zvolen vzorky z oceli P92 s konvekčním hladkým povrchem a vzorky opatřené V-vrubem. Výsledky creepové odolnosti a lomového chování byly doplněny podrobnou mikrostrukturní charakterizací k posouzení iniciace a vývoje creepového poškození. Na základě naměřených výsledků byla creepová data vyhodnocena pomocí neuronových sítí, které systematicky vyhledávají a zpracovávají signál z akustické emise (AE). Akustická emise byla použita jako účinná nedestruktivní metoda pro včasnou predikci počátku možné havárie komponent energetických a chemických zařízení.

### Abstract

This work deals with the determination of the influence of the sample geometry on the development of failure during creep exposure. Creep tests were carried out at a temperature of 600 °C and a stress of 180 MPa in the protective atmosphere of argon. P92 steel samples with a conventional smooth surface and samples with a V-groove notch were chosen for the test tests. The results of creep resistance and fracture behaviour were complemented by detailed microstructural characterization to assess damage initiation and development. Based on the measured results, the creep data was evaluated using neural networks that systematically search for and process the signal from the acoustic emission (AE). Acoustic emission serves here as an effective non-destructive method for early prediction of the beginning of a possible accident of components of power and chemical plants.

### Úvod

Pokročilé popouštěné martenzitické oceli 9-12 %Cr [1, 2] jsou díky své vynikající kombinaci mechanických a oxidačně odolných vlastností častou materiálovou volbou pro vysokoteplotní aplikace, jako jsou součásti kotlů a turbín v elektrárnách spalujících fosilní paliva, které pracují v oblasti creepu při teplotách až 650 °C. Komplexní mikrostruktura této oceli, charakteristická vysokou hustotou dislokací v kombinaci s jemnými precipitáty  $M_{23}C_6$  a MX usazenými na martenzitických lamelách, odpovídá lepší pevnosti oceli v tahu [3]. Nicméně, mikrostruktura těchto ocelí je termodynamicky nestabilní a dlouhodobý provoz snižuje počáteční mechanické vlastnosti oceli, zejména v důsledku zhrubnutí těchto částic a precipitací nežádoucích fází (např. Z fáze, Lavesova fáze).

K hlavním příčinám lomů strojních součástí a zkušebních těles patří náhlé změny tvaru (konstrukční vruby), poruchy struktury (strukturní vruby), přítomnost vlastních napětí I. druhu (napětí vzniklá v důsledku svařování) a degradace mechanických vlastností materiálů s časem. V místech konstrukčních anebo strukturních vrubů tak dochází k iniciaci trhlin. Účinkem vrubu dochází jednak k místnímu zvýšení napětí a rovněž ke změně napjatosti. Vady, jako jsou vruby, jsou u konstrukčních dílů velmi časté. Pochopení účinků vrubů je proto nezbytné pro prevenci



selhání energetických zařízení. Obecně, vruby vytvářejí koncentrace napětí a mění stav napětí z jednoosého na víceosý. Navíc v podmínkách creepové deformace se pole napětí časem přerozdělují. Původně vysoké složky axiálního napětí existující v důsledku vrubu se během vysokoteplotního creepu uvolňují. Všechny tyto faktory ovlivňují životnost vrubových těles a jejich studium je tedy nanejvýš žádoucí.

Pro bezpečný provoz energetických zařízení je nezbytné s předstihem predikovat a identifikovat degradační procesy v materiálu a eliminovat tak možnou havárii celého systému v elektrárnách. Jednou z variant kontinuálního sledování těchto procesů je nedestruktivní metoda akustické emise (AE), která systematicky snímá relevantní signál ze zatěženého vzorku a monitoruje možné degradační procesy v materiálu.

### Experimentální materiál a testovací podmínky

Experimentálním materiálem použitým v této práci byla wolframem modifikovaná 9 % Cr ocel P92. Materiál byl získán ve formě trubek vyrobených společností Vallourec & Mannesmann Tubes, Deutschland. Trubka o vnějším průměru OD = 350 mm a jmenovité tloušťce stěny 55 mm byla dodána ve stavu po provozním tepelném zpracování spočívajícím v normalizaci při 1050 °C/30 min /vzduch a následném popouštění při 765 °C/60 min/vzduch. Jmenovité chemické složení zkoumané oceli je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1: Chemické složení oceli P92 (v hm.%)

Fe	C	Cr	W	Mo	Mn	Mo	Si	Ni	V	Nb	N
Bal.	0.1	8.72	1.55	0.49	0.44	0.48	0.17	0.18	0.20	0.06	0.05

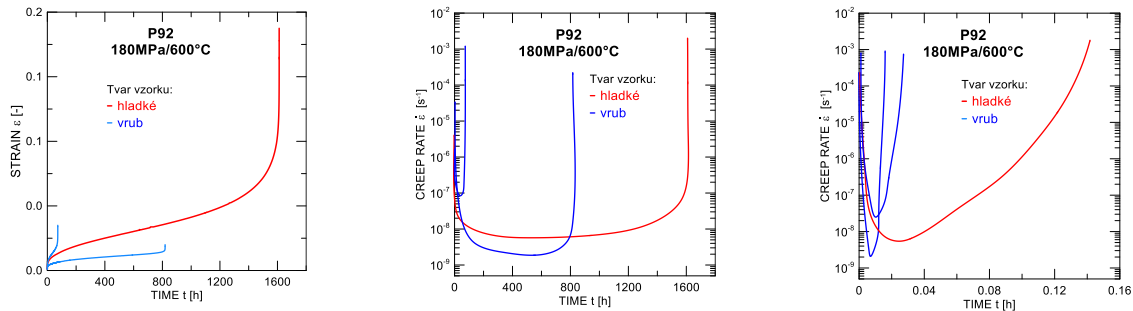
Creepové zkoušky při konstantním zatížení v tahu byly prováděny v ochranné atmosféře argonu a na vzduchu pomocí válcových vzorků o měrné délce 50 mm a průměru 5 mm. Vrbové vzorky byly vyrobeny jako obvodové 60° V-vruby s hloubkou 0,7 mm. Vzorky byly obráběny v podélném směru trubky. Zkoušky creepu byly prováděny při teplotě 600 °C v rozsahu napětí 150-250 MPa. Všechny zkoušky byly vedeny do lomu vzorku. Mikrostrukturní analýza byla provedena transmisním elektronovým mikroskopem (TEM) Jeol 2100F a optickým mikroskopem (OM). Fraktografická vyšetření byla provedena na lomených vzorcích s využitím rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) Tescan Lyra 3 XMU FEG/SEM/FIB/EBSD.

Akustická emise (AE) byla v průběhu creepových zkoušek nepřetržitě monitorována pomocí funkčního prototypu přístroje pro sběr dat IPL-3x4 (18 bitů/15 MHz) vyvinutého společností DAKEL, se vzorkovací frekvencí 15 MHz a celkovým zesílením 130 dB, což umožnilo zachytit emisní události, které byly dříve za hranicí detekce. Během creepových zkoušek byl detekován signál AE, který byl následně převeden na základní parametry (CRE, RMS a další). Vytipované emisní události byly nakonec vyhodnoceny pomocí neuronových sítí. Data z AE byla pravidelně zaznamenávána vždy třikrát denně po dobu 15 minut.

### Creepové zkoušky

Průběhy časové závislosti creepového prodloužení  $t - \epsilon$  pro hladké těleso a těleso s vrubem znázorňují standardní creepové křivky na obr. 2a. Porovnáno je zde creepové chování hladkého a vrubového vzorku při teplotě 600 °C a napětí 180 MPa, aplikovaného v obou případech na hladký průměr vzorku (5 mm). Z důvodu značně rozdílné citlivosti rychlosti creepu k aplikovanému napětí bylo pro lepší grafickou názornost přidáno i menší aplikované napětí (150 MPa) u vzorku s vrubem. K lepší identifikaci jednotlivých stadií creepové křivky (primární, sekundární či stacionární a závěrečné terciární oblasti) byly určeny modifikované verze standardní křivky, znázorněné na obr. 2b a obr. 2c. Z uvedených charakteristik je zřejmé, že hladký vzorek dosáhl výrazně vyšší creepové odolnosti a lomového prodloužení než vrubovaný vzorek. Modifikované verze křivek rovněž odhalily, že u vrubového vzorku tvoří primární stadium creepu dominantní část zkoušky, bezprostředně přecházející v terciální stadium a následnému lomu. Dosavadní studie creepu na hladkých a vrubových tělesech většinou odhalily vyšší creepovou

odolnost vrubových vzorků [4, 5]. Lepší creepová odolnost u vrubových vzorků je zde přisuzována triaxialitě napětí v kořenu vrubu, která je v této malé oblasti rozložena do více směrů oproti jednoosému napětí u hladkých vzorků, případně lokálnímu zpevnění před čelem vrubu či šířící se trhliny. Při překročení určité hodnoty napjatosti pak dochází k lomu vzorku. Rozdílnost těchto výsledků lze přisuzovat faktu, že v těchto případech se zřejmě jednalo o napětí aplikované na průměr měřený v kořenu vrubu a nikoli na vnější průměr jako v této práci.

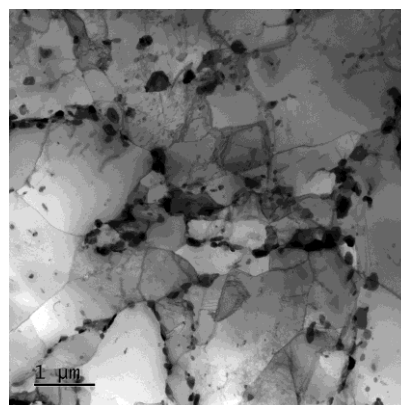
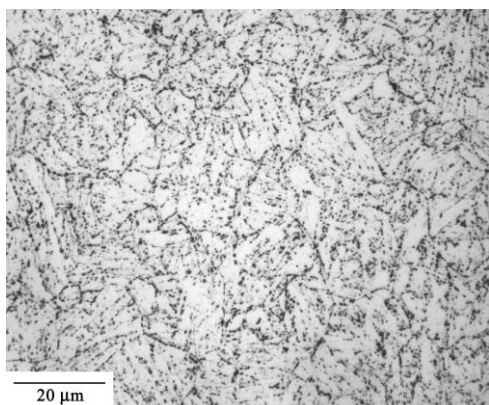


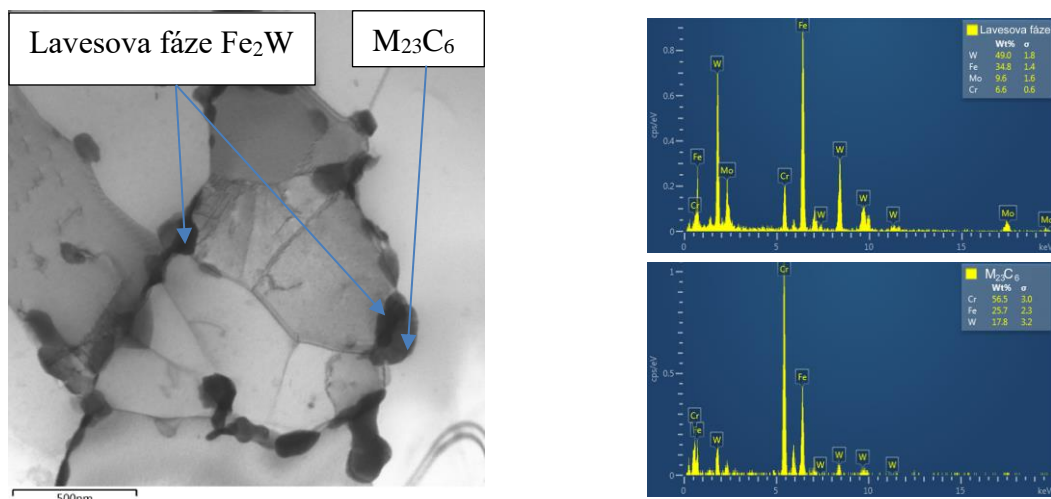
Obr. 1: Creepové křivky oceli P92 pro hladké a vrubové těleso: (a) standardní creepová křivka, (b) a (c) modifikované creepové křivky (creep při teplotě 600 °C a napětí 180 MPa)

### Mikrostrukturní analýza

Mikrostruktura výchozího stavu v normalizovaném a popuštěném stavu je tvořena popuštěným martenzitem s jemnými karbidy  $M_{23}C_6$  na hranicích primárního austenitického zrna, martenzitických lamel a uvnitř subzrn (obr. 2a).

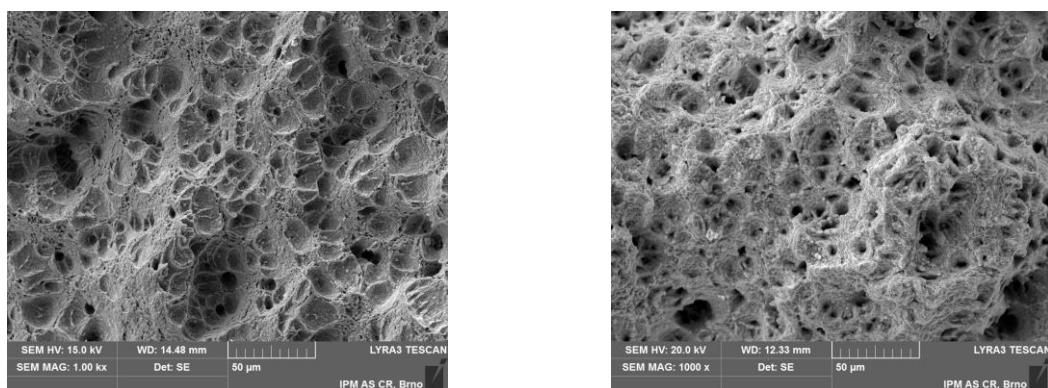
Na obr. 2b,c je znázorněna mikrostruktura po creepové zkoušce při teplotě 600 °C a napětí 180 MPa. V mikrostruktuře lze nalézt karbidy  $M_{23}C_6$ , situované převážně podél hranic původních austenitových zrn a hranic subzrn. Uvnitř hranic zrn a subzrn lze pozorovat i jemné precipitáty MX. Charakteristickým znakem je výskyt velkých subzrn s nízkou hustotou dislokací v interiéru spolu s ojedinělým výskytem dislokací v okolí hranicích zrn. V průběhu creepu došlo rovněž k precipitaci a růstu částic Lavesovy fáze, obvykle spojené s částicemi  $M_{23}C_6$  na hranicích zrna a podzrn. K identifikaci částic Lavesovy fáze a  $M_{23}C_6$  byla použita metoda Energově disperzní spektrometrie (EDS) - (obr. 2d). Zotavení původně vysoké hustoty dislokací, zhrubnutí  $M_{23}C_6$  a původně velmi jemných karbidů a tvorba Lavesovy fáze všeobecně přispívají ke snížení meze pevnosti při tečení.





Obr. 2: Mikrostruktura oceli P92: a) výchozí stav (OM), b, c) po creepové expozici při teplotě 600 °C a 180 MPa (TEM), d) EDS analýza částic

Charakterizace povrchu lomů po creepové expozici byla provedena pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM) jak hladkého, tak i vrubového vzorku. Vrubový vzorek vykazoval smíšený režim, kdy lomu v oblasti blízko kořene vrubu dominoval křehký lom, zatímco v blízkosti středu vzorku převládá tvárný lom. Křehký způsob lomu byl přisuzován mechanickému koncentrátoru napětí v kořeni vrubu, zatímco tvárnému odpovídá lom vytvořený iniciací a koalescencí mikroductin (obr. 3a).

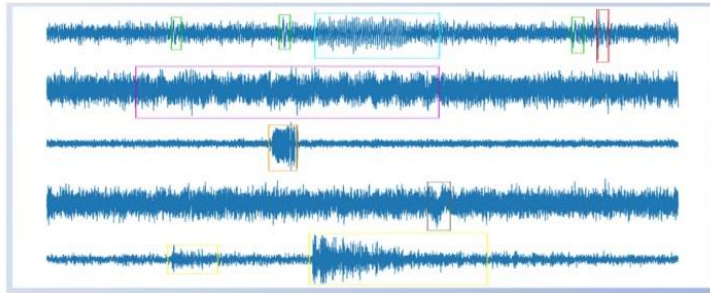


Obr. 3: Lomové plochy creepových vzorků oceli P92 exponovaných při teplotě 600 °C: a) vrubový vzorek (napětí 150 MPa), b) hladký vzorek (napětí 180 MPa)

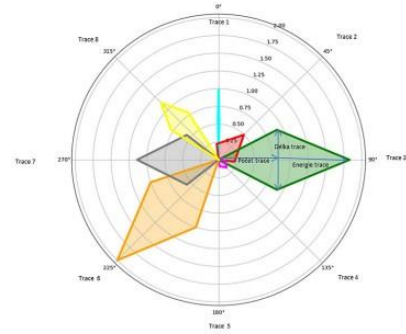
Naproti tomu, lom hladkého vzorku je způsoben lokální ztrátou stability plasticke deformace s výskytem typického transgranulárního tvárného lomu charakterizovaného intragranulárními důlky na lomovém povrchu vzorku (obr. 3b).

### Akustická emise

Jak již bylo uvedeno v průběhu creepové expozice byly průběžně monitorovány degrační procesy materiálu pomocí akustické emise [6]. Na rozdíl od klasického hodnocení AE, kde se primárně hledá překmit signálu nad nastavenou hodnotu, byly v této práci události vyhledány a vyhodnoceny pomocí neuronových sítí. Tyto sítě fungují na principu identifikace tvarových anomálií v signálu, které jsou následně systematicky vyhledávány. Z předchozích záznamů AE bylo vytipováno několik typů anomálií, které se označují jako „stopy“ (obr. 4).



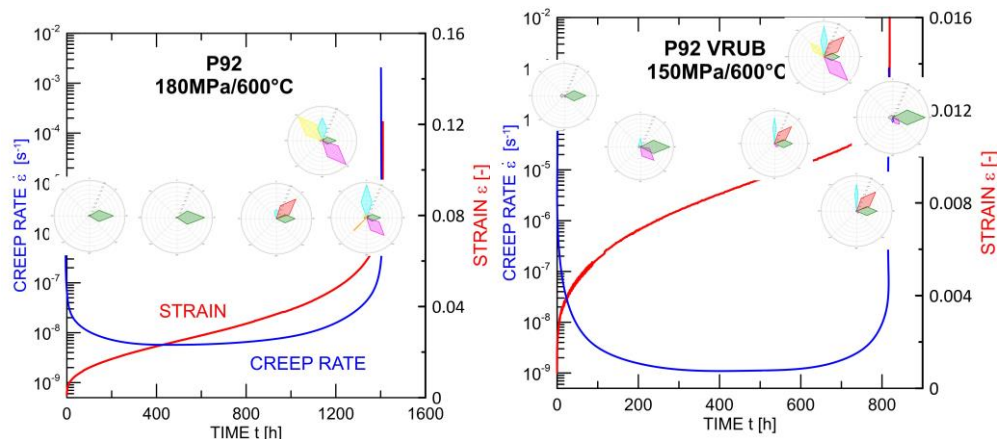
Obr. 4: 8 typů barevně označených „stop“ signálu identifikované neuronovou sítí systému DAKEL - NN



Obr. 5: Grafické znázornění emisních událostí (stop) použitím hvězdicových grafů

Každá stopa má trvale přiřazenou barvu a vyhodnocují se k ní údaje o jejím počtu, délce a energii. Charakteristickým znakem je, že při diagnostické zkoušce dochází v jednotlivých fázích creepové zkoušky k velmi prudkým změnám, projevujícím se rozdílným zastoupením jednotlivých stop. Rychlý přehled o povaze výskytu stop v dané fázi testovacího procesu poskytují hvězdicové diagramy – obr. 5. Ty ukazují průměrné hodnoty stop na jedno diagnostické měření, v tomto případě 15 minut. Hvězdicové mapy nám proto poskytují lepší a jasnější přehled o charakteru výskytu stop v dané fázi testu. Každá hvězdicová mapa ukazuje pro jedno měření (15 min.) průměrný počet stop, jejich průměrnou délku a průměrnou energii.

Dále je třeba poznamenat, že pro jednotlivé materiálové stavy jsou aktivní i různé stopy emisních událostí. Změny v poměru stopových energií související s rozvojem creepového poškození jsou pak jasně patrné na obr. 6. Pro jednotlivé typy vzorku jsou zde v každém grafu vyneseny časové závislosti deformace a creepové rychlosti. Z uvedených grafických záznamů je zřejmé, že na začátku terciárního stadia dochází k nárůstu emisních událostí (stop), což zřejmě úzce souvisí s vývojem a koalescencí dutin. Zároveň, pro oba typy vzorku pozorujeme rozdílné dominantní typy stop především v terciálním stadiu. Lze tedy usuzovat, že snímáním AE ve vybraných typech provozu lze s dostatečným předstihem lokalizovat a identifikovat nežádoucí změny materiálu a snížit tak riziko možné havárie.



Obr. 6: Změny výskytu a poměru Stop pro jednotlivá stadia creepu naměřených AE pro a) hladký a b) vrubový vzorek

## Závěr

Creepové chování hladkého a vrubového vzorku oceli P92 bylo studováno současně se záznamem AE. Mikrostruktura po creepové expozici při teplotě 600 °C obsahovala hrubé karbidy  $M_{23}C_6$ , které byly převážně umístěny podél hranic zrn a jemné precipitáty MX, vyskytující se



uvnitř hranic zrn a subzrn. Byly rovněž detekovány i částice Lavesovy fáze. Studium lomových ploch odhalilo transgranulární tvárné porušení v důsledku koalescence dutin. Průběžné sledování degradačních procesů při creepové expozici pomocí AE ukázalo, že je možné s předstihem zachytit iniciaci a šíření defektů v tlakovém potrubí.

### Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TK03020089 – THÉTA a projektu TN02000018 NCK Strojírenství.

### Literatura

- [1] HALD, J.: Creep strength and ductility of 9 to 12% chromium steels. *Materials at High Temperatures*, 2004, vol. 21, p. 41-46.
- [2] MAYER, K-H. - MASUYAMA, F. The development of creep-resistant steels. *Creep-Resistant Steels*. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2008, p. 15-77.
- [3] ROJAS, D. - GARCIA, J. - PRAT, O. - CARRASCO, C. - SAUTHOFF, G. - KAYSSER-PYZALLA, A. R. Design and characterization of microstructure evolution during creep of 12% Cr heat resistant steels. *Materials Science and Engineering, A* 527, 2010, p. 3864-3876.
- [4] VAIDYA, A. - BALLAL, A. - YADAVH, K. - PESHWE, D. Stress Rupture Studies of V-notched Grade 92 Steel for High Temperature Applications. *Procedia Structural Integrity*, 2019, vol. 14, p. 410-415.
- [5] GOYAL, S. - LAHA, K. Creep life prediction of 9Cr–1Mo steel under multiaxial state of stress *Materials Science and Engineering, A* 615, 2014, p. 348-360.
- [6] DVOŘÁK, J., SKLENIČKA, V., KRÁL, P., KVAPILOVÁ, M., SVOBODOVÁ, M., ŠIFNER, J., KOULA, V.: Studie odhadu creepového poškození oceli pro energetická zařízení. In: *16. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Srní: Západočeská univerzita v Plzni, 2021, s. 93-99. ISBN 978-80-261-1045-3.



## VÝZKUM CREEPOVÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU POMOCÍ MALÝCH VZORKŮ

### INVESTIGATION OF CREEP PROPERTIES USING SUB-SPECIMENS

Eva Chvostová a Pavel Konopík

COMTES FHT a.s., Dobřany

#### Abstrakt

Jednou z metod hodnocení mechanických vlastností materiálu v případě jeho omezeného množství materiálu je použití metod, které se zaměřují na použití miniaturizovaných zkušebních vzorků. Tato studie zkoumá vlastnosti tečení pomocí malých vzorků s průřezem 2x1 mm. Článek popisuje metodiku studia creepových vlastností laserem řízené energetické depozice (L-DED) oceli vyrobené z oceli Inconel 718 (IN718) a creepové oceli 10Cr-3W-3Co-1Mo bez dusíku při teplotě 650 °C.

#### Abstract

One method of evaluating the mechanical properties of a material in the case of a limited amount of material is the use of methods that focus on the use of miniaturized test specimens. This study investigates the creep properties using small specimens with a cross section of 2x1 mm. The article describes the methodology of studying the creep properties of laser-directed energy deposition (L-DED) of steel made from Inconel 718 (IN718) steel and 10Cr-3W-3Co-1Mo creep steel without nitrogen at a temperature of 650 °C. Emphasis was placed on the practical use of test results.

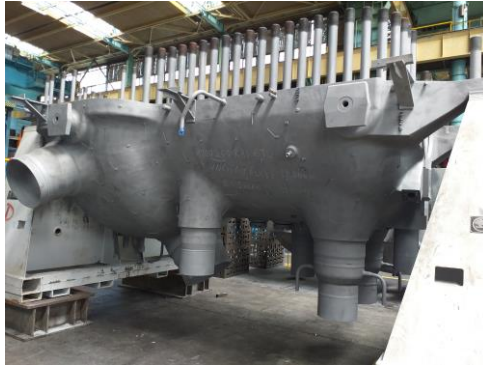
#### Úvod

Degradace mechanických vlastností kovových materiálů může vést ke ztrátě spolehlivosti a bezpečnosti strojů a kovových konstrukcí v elektrárnách při jejich provozu. Pro stanovení aktuálních materiálových vlastností je možné použít nedestruktivní techniky odběru vzorku a s pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních těles (např. mikro-tahová zkouška, únava miniaturních těles, zkoušky mini-Charpy pro určení přechodové teploty FATT) predikovat zbytkovou životnost komponent. Tento příspěvek představuje potenciál aplikace těchto miniaturizovaných vzorků pro určení aktuálních mechanických vlastností materiálů na konkrétním případě turbínového tělesa.

#### Experimentální materiál

Pro stanovení aktuálních mechanických vlastností tělesa jako podkladů pro vyhodnocení provozuschopnosti spodku vnějšího ST tělesa vyrobeného z materiálu G17CrMoV5-10 bylo semidestruktivně odebráno malé množství zkušebního materiálu jak ze studené, tak z teplé části. Těleso při odstávce mělo aktuálně najeto cca 80 tisíc provozních hodin.

Jeho fotografie je na obr. 1, na obr. 2 je znázorněno místo a průběh odběru. Pro stanovení aktuálního stavu mechanických vlastností degradovaného materiálu byly provedeny zkoušky tahem, vyhodnocena přechodová teploty FATT50 (označení dle příslušné normy je Tt50 %SFA) a vyhodnocená mikrostruktura. [1]



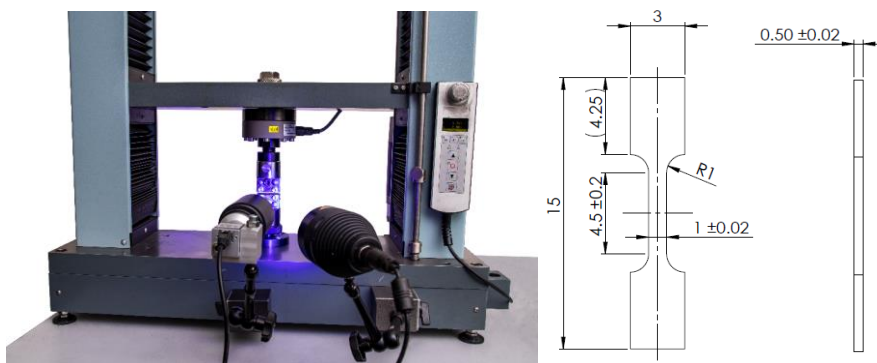
Obr. 1: Fotografie spodní části vnějšího ST tělesa



Obr. 2: Místo odběru a průběh odběru pomocí odběrového zařízení EDSE

### Provedení zkoušek tahem pomocí mikro tahových vzorků

Z odebraných vzorků byla vyrobena zkušební tělesa typu M-TT, jejich geometrie je uvedena na obr. 3 vpravo a tělesa byla testována na zkušebním stroji TiraTest se silovou kapacitou 10 kN. Deformace byla měřena pomocí jednokamerového optického snímače deformace MERCURY RT založeného na bázi digitální obrazové korelace (DIC). Zkušební sestava je vyobrazena na obr. 3 vlevo.



Obr. 3: Zkušební sestava pro zkoušku tahem (vlevo) a geometrie vzorku (vpravo)

Výsledky zkoušek tahem jsou uvedeny v tabulce 1, kde jsou zároveň porovnány se vstupními údaji a předpisem pro daný materiál.

Tab. 2: Porovnání výchozích a aktuálních hodnot

Teplá část	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A	Studená část	R <sub>p0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A
	MPa	MPa	%		MPa	MPa	%
Výchozí hodnoty	495	636	23	Výchozí hodnoty	495	636	23
Aktuální hodnoty	459	597	18	Aktuální hodnoty	461	592	20
Rozdíl hodnot	-36	-39	-4	Rozdíl hodnot	-34	-44	-2
Pokles [%]	7	6	19	Pokles [%]	7	7	11
Předpis	min. 440	590-780	min. 15	Předpis	min. 440	590-780	min. 15

### Zkoušky rázem v ohybu, Tt50 %SFA

Zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy byly provedeny dle ČSN ISO 148-1 a dle ČSN EN ISO 14556 (Instrumentovaná zkušební metoda) na zkušebních tělesech nimi Charpy. Tělesa byla přerážena na kladivu Charpy o kapacitě 15 J. Z výsledků zkoušek byla stanovena přechodová teplota pro tělesa Mini Charpy se známým korelačním přepočtem +cca 65 °C. [2, 3] a odhad nárazové práce KV. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 3: Výsledky přechodové teploty Tt50 %SFA (FATT) určené ze zkoušky rázem v ohybu mini-Charpy vzorků s průřezem 3x4x27 mm vs. porovnání odhadnutých hodnot platných pro tělesa 10x10x55 mm a přepočet nárazové práce (KV) z mini-Charpy těles na standardní zkušební tělesa

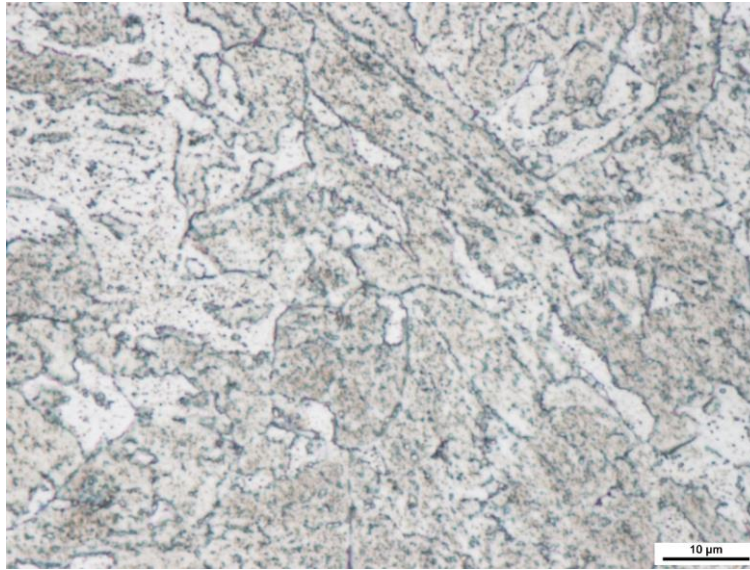
Odběrné místo	Tt50%SFA	Tt50%SFA odhad	Studená část	KV	KV odhad
	°C	°C		J	J
	3x4x27	10x10x55		3x4x27	10x10x55
Teplá část	16	81	Teplá část	3,9	24±12
Studená část	-37	28	Studená část	7,0	70±19

Pro porovnání výsledků nebyla dodána minimální předepsaná hodnota přechodové teploty Tt50 %SFA. Minimální předepsaná hodnota nárazové práce KV při pokojové teplotě je 27 J. Hodnoty přepočtu KV z mini-Charpy vzorků na standardní zkušební tělesa jsou v případě studené části vyhovující. V případě teplé části se hodnota přepočtu může s největší pravděpodobností pohybovat pod spodní hranicí přípustnosti. Poměrně výrazný pokles vrubové houževnatosti po několika desítkách tisíc provozních hodin je však u odlitků turbínových těles jevem obvyklým a na další provozní životnost tělesa by podle našich zkušeností neměl mít prozatím významnější vliv. Nicméně je třeba sledovat trend případného dalšího poklesu KV.

### Mikrostruktura

Mikrostruktura vnějšího ST tělesa v obou kontrolovaných místech odpovídá použitému materiálu a způsobu aplikovaného tepelného zpracování. Ve struktuře nebyla zjištěna přítomnost zvýšeného množství nekovových vměstků ani výskyt žádných nepříznivých fází a defektů. Z pohledu degradace materiálu vlivem dlouhodobého působení vysokých provozních teplot lze stav mikrostruktury tělesa v obou kontrolních místech hodnotit jako plně vyhovující bez výskytu projevů kavitáčního poškození. Co se týče přeměn mikrostruktury a jejího difúzního rozpadu, tak ve vnějším ST tělese došlo vlivem difúzních procesů k přerozdělení karbidické fáze a k jejímu mírnému zhrubnutí. Hrubší karbidy jsou vyloučeny přednostně na hranicích původního austenitického zrna a zejména v teplé části vykazují počátky řetězení, viz obr. 4. Tyto strukturní změny souvisí s difúzními pochody a jsou zapříčiněny dlouhodobým působením vysokých provozních teplot. Lze je tedy považovat za určité zárodečné projevy počínající degradace materiálu vlivem provozu. I přesto je stav mikrostruktury v obou kontrolovaných lokalitách prozatím vyhovující pro další provoz bez jakýchkoliv omezení Tyto strukturní změny souvisí s difúzními pochody a jsou zapříčiněny dlouhodobým působením vysokých provozních teplot. Lze je tedy považovat za určité zárodečné projevy počínající degradace materiálu vlivem

provozu. I přesto je stav mikrostruktury v obou kontrolovaných lokalitách prozatím vyhovující pro další provoz bez jakýchkoliv omezení. Pro zjištění trendu degradace doporučujeme provést stejnou kontrolu po absolvování další cca 35 – 40 tisíc provozních hodin (tj. cca 5 let).



Obr. 4: Mikrostruktura vnějšího ST tělesa, teplá část, 1000x

### Závěr

Ze zjištěných skutečností vyplývá, že vlivem dlouhodobého provozu za náročných provozních podmínek dochází k degradaci materiálu. To se projevuje změnami v mikrostrukturu a poklesem sledovaných mechanických vlastností. Jistý pokles je samozřejmý a očekávatelný, důležité je však vysledovat trendy a progres těchto procesů. Metoda zkoušení malých vzorků získaných téměř neinvazivním odběrem zkušebního materiálu je tudíž velmi smysluplným a užitečným nástrojem, jak tyto degradační projevy monitorovat.

Portfolio zkušebních metod je možné rozšířit i o zkoušky vysoko, nízko cyklové únavy, lomové houževnatosti, zkoušek tečení (creepu), šíření trhliny a získat tím co nejkompaktnější přehled o stavu materiálu kritických komponent energetických zařízení za účelem predikce jejich zbytkové životnosti. To pak přináší profit ve spolehlivosti a bezpečnosti provozu a efektivitě údržby.

Relevantnost výše uvedené metodiky zkoušení malých vzorků je akceptována i největším provozovatelem energetických zařízení v ČR, o čemž svědčí začlenění této metodiky do legislativních procesů provozování a údržby zařízení společnosti ČEZ, a to formou volné přílohy k dokumentu PŘS ČEZ\_ME\_0990 Materiálová diagnostika parních turbín, jejímž vypracováním byla pověřena právě naše společnost COMTES FHT a.s.

### Literatura

- [1] VOKÁČ, Jindřich. Hodnocení aktuálních mechanických vlastností vnějšího ST tělesa. Dobřany, COMTES FHT a.s., červenec 2022, technická zpráva, PZP 220707.
- [2] WALIN. K. Fracture Toughness of Engineering Materials. ISBN 978 0 9552994 6 9.
- [3] CHVOSTOVÁ, E. Application of Metallographic Investigation in Development of Sub-Sized Specimen Testing Techniques. *Defect and Diffusion Forum*, July 2022, no. 6 p. 111-116, doi: 10.4028/p-xfxoh7



## **IDENTIFIKACE VLIVU VODÍKU V ZÁVISLOSTI NA KONSTRUKČNÍM STAVU POTRUBNÍ DISTRIBUČNÍ INFRASTRUKTURY A SKLADOVACÍCH NÁDRŽÍ**

### **IDENTIFICATION OF THE EFFECT OF HYDROGEN AS A FUNCTION OF STRUCTURAL CONDITION IN PIPELINE DISTRIBUTION INFRASTRUCTURE AND STORAGE TANKS**

Hana Jirková, David Aišman, Marie Frank Netrvalová a Šárka Houdková

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 46, 301 00 Plzeň

#### **Abstrakt**

Výzkumný projekt „Identification of the effect of hydrogen as a function of structural condition in pipeline distribution infrastructure and storage tanks“ s akronymem HOOPLA byl podán v rámci výzvy Clean Energy Transition (CET), výzva 2022. Hlavním cílem projektu je zvýšit využití ekologicky neutrálního vodíku ve vodíkových směsích ve stávajících dopravních a skladovacích zařízeních používaných pro zemní plyn. V rámci projektu HOOPLA bude zkoumána odolnost konstrukčních materiálů potrubí a zásobníků vůči vodíkové křehkosti a degradaci v závislosti na předchozí historii zpracování (tváření, odlévání, tepelné zpracování) a povrchových úpravách.

#### **Abstract**

The research project with title “Identification of the effect of hydrogen as a function of structural condition in pipeline distribution infrastructure and storage tanks“, with acronym HOOPLA was submitted under the Clean Energy Transition (CET) call 2022. The main aim of the project is to increase the use of environmentally neutral hydrogen in hydrogen mixtures in existing transportation and storage facilities used for natural gas. HOOPLA will investigate the resistance to hydrogen embrittlement and degradation of the structural materials of the pipelines and storage vessels as a function of the previous processing history (forming, casting, heat treatment) and surface treatments.

#### **Úvod**

Současný trend snižování emisí CO<sub>2</sub> výrazně rozšířil oblast zájmu v oblasti výroby, skladování, transportu a využití vodíku. Jedná se zejména o oblast dopravy a energetiky. Velmi diskutovanou možností je využití směsi zemního plynu a vodíku. Hlavní složkou zemního plynu je methan, který je velmi agresivním skleníkovým plynem. Jednou z možností, jak jeho spotřebu omezit, je využití vodíku, nebo ještě lépe tzv. „zeleného“ vodíku, který je k životnímu prostředí výrazně šetrnější. „Zelený“ vodík vzniká s pomocí obnovitelných zdrojů bez uvolňování skleníkových plynů.

Jednou z důležitých otázek využití směsi zemního plynu a vodíku, tzv. blendu, je jeho přeprava k finálnímu spotřebiteli. V současné době se předpokládá použití stávajících potrubních systémů pro transport zemního plynu. Vodík působí negativně na mechanické vlastnosti ocelí, dochází tzv. vodíkové křehkosti (HE – hydrogen embrittlement). Vodík může způsobit výraznou ztrátu tažnosti, zejména v přítomnosti koncentrátorů napětí [1]. Kromě toho vodík potenciálně zvyšuje rychlost růstu existujících trhlin při cyklickém tlakovém zatížení, zhoršuje lomovou houževnatost a v nadměrném množství vede ke vzniku vodíkem indukovaných trhlin [2, 3]. To vše vede ke zkrácení životnosti plynovodu ve srovnání s provozem na zemní plyn. Vodíková křehkost závisí na mnoha parametrech jako je typ materiálu, jeho zpracování, ale také na historii materiálu. Závisí také na množství vodíku ve směsi se zemním plynem a na tlaku.



Vzhledem k délce potrubí je nutné použít ekonomicky nenáročné materiály. Většinou se používají středněpevnostní potrubní oceli. Patří mezi ně například oceli API 5 L X42, X46 a X52, které pracují při tlaku až 13 MPa. Pro vyšší vodíkové tlaky jsou používány oceli API 5 L X60, X70 a X80 [4, 5].

### Partneři projektu

Hlavním koordinátorem projektu je výzkumná instituce **Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.**, která již řadu let provádí řadu hodnocení životního cyklu tepláren a elektráren, a proto má velký přehled o vývoji trhu a kontakty na energetické společnosti v ČR (např. ČEZ, a. s.; EPH a.s.; Sev.en Energy AG aj.). Mezi její další významné aktivity patří povrchové úpravy a vývoj v oblasti neuronových sítí a umělé inteligence. Velmi podobné kontakty má i výzkumná instituce **MATERÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o.**, která se rovněž zabývá hodnocením stavu tepelných elektráren a má velké zkušenosti s vodíkovou křehkostí potrubních materiálů. **Západočeská univerzita v Plzni** a **Technická univerzita v Chemnitz** z Německa mají dlouholeté zkušenosti v oblasti objemového a plechového tváření, včetně simulací těchto procesů metodou konečných prvků. Celé konsorcium doplňuje **Univerzita v Modeně a Reggio Emilia** v Itálii, kde jsou odborníci na povrchové úpravy a jejich charakterizaci velmi pokročilými metodami.

### Vodíková křehkost s ohledem na stav materiálu

Náchylnost ocelí k HE koreluje s jejich pevností. Pevnější oceli jsou obecně náchylnější k HE. Pevnost materiálu je dána především jeho mikrostrukturou, která se získává různými postupy tváření a tepelným zpracováním. Tyto postupy ovlivňují hustotu dislokací přítomných ve struktuře. Zvýšená hustota dislokací usnadňuje vodíkem zesílenou dekohezi, respektive vodíkem zesílenou lokalizovanou plasticitu [5]. To bylo podpořeno zjištěním, že struktura s globulárním bainitem a acikulárním feritem a quazi-polygonálním feritem vykazuje lepší odolnost vůči HIC (hydrogen induced cracking) oproti strukturám tvořených laťkovitým a globulárním bainitem Li et al. [6].

V potrubních soustavách je i řada dílů, která nejsou ve stavu tvářeném, ale litém. I v případě velmi kvalitních odlitků se v těchto dílech vyskytuje celá řada mikropórů a mikrodefektů, které jsou z hlediska HE velmi nebezpečné. Atomární vodík H difunduje materiálem a rekombinuje se jako molekulární vodík  $H_2$  uvnitř dutin. V důsledku toho vnitřní tlak stoupá a stále roste, protože atomární vodík stále difunduje, dokud nedosáhne rovnováhy mezi mřížkovým vodíkem a vodíkem uvnitř dutiny. Tlak může v některých případech dosáhnout stovek MPa a vytváří kolem dutiny napěťové pole, které může vést k prasknutí [7]. Bylo zjištěno, že dutiny působí v materiálu jako silná záchytná místa pro vodík [7]. Difúze vodíku v litých vzorcích je z důvodu jeho zachytávání v dutinách pomalejší než u vzorků kovaných.

Vedle typu struktury může být odolnost materiálu, který je dlouhodobě vystaven vodíkovému prostředí, vůči vodíkové křehkosti, zvýšena i vhodnou povrchovou úpravou. Tím dojde k zamezení pronikání vodíku dovnitř materiálu a nedochází k jeho interakci s mřížkovými defekty a pastmi, jako jsou vakance a dislokace [8]. V úvahu přicházejí různé technologie (např.: HVOF procesy, cold spray). Cold spray se jeví jako jedna z potenciálně vhodných metod, protože umožňuje vytvářet vrstvy z různých typů prášků, které jsou konvenčními metodami nemísitelné. Navíc oproti žárovým nástřikům nebo navařování nezpůsobuje teplotní ovlivnění povrchu, a tedy nezvyšuje jeho entropii.

Z toho všeho vyplývá, že odolnost materiálu potrubí nebo i zásobníků plynů, které budou přenášet směsný plyn zemního plynu a vodíku, vůči vodíkové křehkosti je silně závislá i na předchozí historii zpracování. Přechozí kroky zpracování jako postup tváření, tepelné zpracování a povrchové úpravy výrazně ovlivňují vnitřní strukturu materiálů (typ struktury, poruchy

krystalové mřížky, dutiny, póry), čímž dochází k uplatňování různých druhů vodíkové křehkosti. Popis chování různých stavů materiálů ve vodíkovém prostředí přispěje k bezpečné přepravě směsných plynů a ke snížení využívání fosilních paliv, emisí skleníkových plynů a dosažení požadované dekarbonizace průmyslu.

### Experimentální program

Pro experiment budou používány oceli pro potrubí jako API L 52, X60 a X70. Dále budou používány i vzorky obvyklé v produktovodech na území České republiky jako ČSN 41 1373, ČSN 41 3030 a další.

Sycení vzorků vodíkem bude prováděno různým způsobem. Bude se jednat o elektrolytické sycení vzorků vodíkem v různém typu elektrolytu. Dále budou testovány i různé doby výdrže.

Vstupní materiál pro vodíkování bude připravován různými procesy tváření, tepelného a termomechanického zpracování. Budou využity tvářecí technologie jako volné kování, inkrementální kosé válcování nebo válcování plechů. Ohřev polotovarů bude probíhat v elektrických atmosférických pecích bez ochranné atmosféry. Budou testovány různé teploty ohřevu v závislosti na chemickém složení materiálu a jeho fázových přeměnách.

Součástí experimentu bude i povrchová úprava vzorků metodou cold spray. Ve styku s atmosférou bohatou na vodík lze testovat potenciál celé řady materiálů na bázi slitin s vyšší odolností proti HE, např. na bázi Ni. V případě skladování vodíku při nízkých teplotách lze také uvažovat o povlacích na bázi slitin CoCrFeMnNi, které mají vysokou tažnost a lomovou houževnatost při kryogenních teplotách.

Pro předpověď zbyvajících životnosti kritických součástí pro přepravu plynu (potrubí, spínací zařízení, spojky atd.) budou implementovány modely konečných prvků a modely založené na umělé inteligenci (strojové učení).

### Výstupy projektu

Výstupy projektu povedou k rychlejšímu přechodu od zemního plynu ke směsi vodíku a zemního plynu a umožní bezpečnou přepravu těchto směsí ve stávajících dopravních a skladovacích systémech. Větší využívání vodíku na úkor zemního plynu povede v příštích letech k výraznému snížení emisí CO<sub>2</sub>.

Mezi hlavní výstupy projektu patří certifikované metodiky pro sycení a zkoušení vzorků ve vodíkovém prostředí. Certifikovaná metodika pro elektrolytické sycení vzorků zajistí opakovatelné sycení zkušebních vzorků z různých materiálů. Druhou certifikovanou metodikou bude postup hodnocení pevnostních a plastických vlastností v prostředí vysokého tlaku vodíku in situ až do 30 MPa. Metodika bude zaměřena na stanovení mechanických vlastností na vzorcích s různou geometrií s hladkou částí nebo vybavených definovaným vrubem simulujícím vrubový účet skutečné konstrukční části.

Dále bude vyvinuta ověřená technologie, která bude definovat proces tváření a jeho parametry, jakož i parametry tepelného zpracování pro dosažení vhodné mikrostruktury použitých materiálů. Mezi další výstupy budou patřit články v odborných časopisech a prezentace výsledků na lokálních i mezinárodních konferencích.

### Poděkování

Tento projekt (Projekt HOOPLA č. TH83020002) je financován se státní podporou Technologické agentury ČR (TA ČR) v rámci programu EPSILON Partnerství CET Call 2022.

## Literatura

- [1] LAUREYS, A. et al. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 101, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104534>
- [2] WANG, M. - AKIYAMA, E. - TSUZAKI, K. Effect of hydrogen on the fracture behavior of high strength steel during slow strain rate test. *Corrosion Science*, 2007, vol. 49, no. 11, p. 4081-4097, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.038>
- [3] WANG, M. - AKIYAMA, E. - TSUZAKI, K. Effect of hydrogen and stress concentration on the notch tensile strength of AISI 4135 steel. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 398, no. 1-2, 37-46, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.008>
- [4] HAESLONCKX, D. - D'HAESELEER, W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 10-11, p. 1381-1386. ISSN 0360-3199.
- [5] WU, X. - ZHANG, H. - YANG, M. - JIA, W. - QIU, Y. - LAN, L. From the perspective of new technology of blending hydrogen into natural gas pipelines transmission: Mechanism, experimental study, and suggestions for further work of hydrogen embrittlement in high-strength pipeline steels. *International Journal of hydrogen energy*, 2022, vol. 47, p. 8071-8090, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.108>
- [6] LI, H. - NIU, R. - LI, W. - LU, H. - CAIRNEY, J. - CHEN, Y.-S. Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 105, paper 104709, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104709>
- [7] LI, J. - GAO, X. - DU, L. - LIU, Z. Relationship between microstructure and hydrogen induced cracking behavior in a low alloy pipeline steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, vol. 33, no. 12, p. 1504-1512.
- [8] YAKTITI, A. - DREANO, A. - CARTON, J. F. - CHRISTIEN, F. Hydrogen diffusion and trapping in a steel containing porosities. *Corrosion Science*, 2022, vol. 199, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110208>
- [9] MORIMOTO, T. - KUMAI, T. Prevention of hydrogen embrittlement using ultra rapid cooling thermal spraying gun. *ISIJ International*, 2017, vol. 57, no. 8, p. 1461-1467, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-060>

# KOROZNÍ ODOLNOST ODS-EUROFER V PROSTŘEDÍ HLM

## CORROSION RESISTANCE OF ODS-EUROFER IN HLM ENVIRONMENT

Martina Pazderová <sup>a)</sup>, Anna Hojná <sup>a)</sup>, Jan Vít <sup>a)</sup>, Hynek Hadraba <sup>b)</sup> a Jan Čížek <sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o.

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

<sup>c)</sup> Ústav fyziky a plazmatu AV ČR v. v. i.

### Abstrakt

Feriticko-martensitické oceli jsou slibnými kandidáty pro použití v reaktorech chlazených těžkými kovy. Při teplotách vyšších než 550 °C bohužel dochází k výraznému poškození oceli Eurofer-97, proto byla ověřena možnost zvýšení korozní odolnosti Eurofer-97 pomocí disperze oxidů Sc, Y a Al. Korozní chování ODS-Eurofer bylo ověřeno expozicí v Pb při 600 °C s koncentrací kyslíku 10<sup>-6</sup> hm.%. Následné vyhodnocení povrchu a řezu po expozici potvrdilo oxidační poškození, rozpouštění oceli a penetraci Pb do struktury oceli. EDS charakterizace ukázala, že přítomnost oxidů Sc a Al změnila mechanismus korozního poškození. ODS-Eurofer vykazoval po 1000 h expozice zejména interní poškození, kde byly oxidy tvořeny Pb+Cr-O a Cr-O+Al-O vrstvami. Kvantitativní vyhodnocení koroze ukázalo, že korozní poškození ODS-Eurofer je výrazně nižší než v případě Eurofer-97.

### Abstract

Ferritic-martensitic steels can be used for GEN IV reactors as a structural material. The applicability of Eurofer is limited by the temperature of 550 °C and the possibility of corrosion resistance improvement was studied. The influence of Sc, Y, and Al was evaluated at 600 °C using 10<sup>-6</sup> wt.% oxygen concentration. Evaluation of the surface and cross section after the 500 h and 1000 h exposure confirmed the oxidation, solution based attack, and Pb penetration into the material's structure. EDX analysis revealed the different corrosion mechanism for steel containing Sc and Al oxides. ODS-Eurofer steels after 1000 h of exposure showed mainly inner oxidation. The inner oxidation consisted of Pb+Cr-O and Cr-O+Al-O layers mixture. Degradation of ODS steel was significantly lower than Eurofer-97.

### Úvod

Feriticko-martensitické oceli představují materiály, které by mohly být použity pro reaktory chlazené tekutými kovy. Určité omezení představuje pracovní teplota, která se pohybuje nad 550 °C a standardní Eurofer-97 za těchto podmínek ztrácí svojí korozní odolnost. Určitou možnost na zlepšení protikorozních vlastností nabízí oxidy zpevněné oceli (oxide dispersion strengthened – ODS). Dřívější experimenty ukázaly, že zabudováním nanočástic oxidů Y a Ti do mikrostruktury dochází k vysokoteplotnímu zpevnění. Porovnáním korozních vlastností Eurofer-97 a ODS-Eurofer ukazuje, že ODS oceli mají právě díky oxidickým nanočásticím vyšší protikorozní odolnost, a to zejména při teplotách vyšších než 550 °C [1-6]. V této studii byly využity prvky, které jsou známé pro svoje oxidační vlastnosti a odolnost v HLM prostředí, Al, Sc a Y.

### Experimentální část

Pro hodnocení korozní odolnosti byly použity jednak vzorky Eurofer-97, které v tomto případě představovaly standardní materiál, ke kterému byly vztaženy výsledky získané u ODS-Eurofer ocelí. Modifikace vlastností byla provedena přidávkem oxidů Sc a Y a u druhé varianty byly použity oxidy Sc, Y a Al. Chemické složení jednotlivých ocelí je uvedeno v tabulce 1. Vzorky Eurofer-97 byly tepelně zpracovány při 980 °C (30 min) a následně chlazeny

na vzduchu a temperovány při 760 °C po dobu 90 min. ODS-Eurofer byl připraven mechanickým legováním oxidy Sc a Y (Sc-Y-ODS) a oxidy Sc, Y a Al (Al-Sc-Y-ODS) [7].

Korozní experimenty probíhaly ve statickém tanku, který je tvořený nerezovou nádobou o objemu 4,5 l s vnějším topením. Uvnitř je umístěn Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kelímek, který zabraňuje kontaktu korozního prostředí s experimentálním zařízením a výsledky nejsou ovlivněny rozpouštěním nerezové nádoby. Pracovní teplota byla po dobu experimentu udržována na 600 °C a koncentrace kyslíku na hodnotě 1x10<sup>-6</sup> hm.%. Ochranná atmosféra byla tvořena směsí Ar+H<sub>2</sub> (6 %). Stanovení obsahu kyslíku a aktivní řízení bylo prováděno pomocí kyslíkového senzoru na bázi Bi/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a automatického dávkování směsí Ar+H<sub>2</sub> (6 %) a Ar+O<sub>2</sub> (10 %).

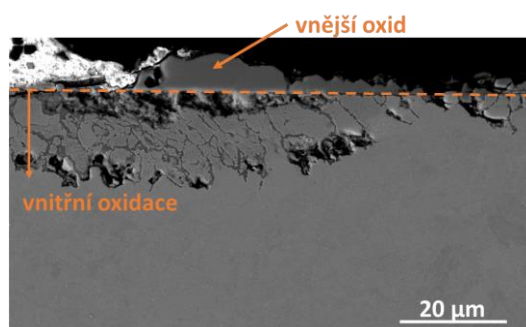
Tab. 1: Chemické složení oceli Eurofer-97 a ocelí ODS Eurofer, hm.%

Element	Fe (wt%)	Cr (wt%)	Mn (wt%)	W (wt%)	V (wt%)	Ta (wt%)	Y (wt%)	Sc (wt%)	Al (wt%)
Eurofer-97	Bal	9.0	0.55	1.0	0.2	0.14	-	-	-
Sc-Y-ODS	Bal	8.9	0.72	0.9	0.2	0.13	0.16	0.28	-
Al-Sc-Y-ODS	Bal	9.2	0.55	0.8	0.2	0.13	0.1	0.2	1.0

## Výsledky a diskuze

Korozní poškození ocelí v prostředí tekutého olova závisí na koncentraci kyslíku v něm rozpouštěním. Obsah kyslíku nižší než 10<sup>-8</sup> hm.% způsobuje převážně rozpouštění oceli, protože jeho koncentrace není dostatečná pro vytvoření stabilní ochranné oxidické vrstvy. Z výsledků tohoto experimentu je patrné, že přítomnost kyslíku v koncentraci 10<sup>-6</sup> hm.% způsobila jednak nárůst vnější oxidické vrstvy, ale zároveň docházelo i k vnitřní oxidaci. K výraznému koroznímu poškození dochází na začátku expozice během prvních 500 h a následně se degradační procesy zpomalují.

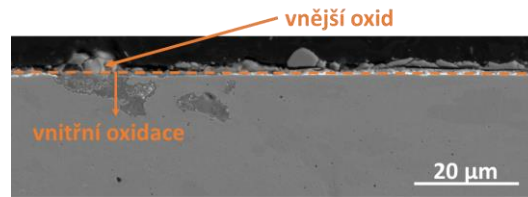
Eurofer-97 měl po 1000 h expozice nesouvislou vrstvu vnějšího oxidu na 55 % povrchu. Průměrná tloušťka vnějšího oxidu byla 1,4 μm a maximální naměřená hodnota byla 17,4 μm. silnou vrstvu ochranného oxidu bylo možné pozorovat pouze ojediněle, a proto neplnila ochranný charakter. Vnitřní oxidaci, rozpouštění a zatékání olova (SBA) do struktury oceli bylo možné pozorovat zejména na povrchu, který nebyl pokrytý vnějším oxidem (viz obr. 1). Interní poškození bylo na konci expozice možné pozorovat na 74 % povrchu s maximální hloubkou lokálního napadení 19,6 μm. Korozní rychlost Eurofer-97 po 1000 h expozice odpovídala 893 μm/rok.



Obr. 1: Korozní poškození Eurofer-97 po 1000 h expozice

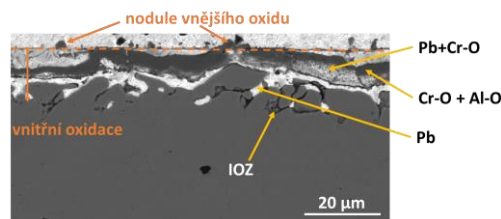
Vnější a vnitřní oxidaci a SBA bylo možné pozorovat i u Sc-Y-ODS (viz obr. 2). Vnější oxid se vytvořil pouze na 26 % povrchu ve formě nodulí. Vnitřní poškození dosáhlo hodnot srovnatelných s Eurofer-97, ale přítomnost oxidů Sc a Y ve struktuře zvýšila schopnost Cr zakonzentrovat se pod povrchem a vytvořit vrstvu zabraňující degradaci oceli, změnil se charakter poškození a došlo ke snížení celkového úbytku materiálu. Korozní rychlost Sc-Y-ODS po 1000 h expozice odpovídala 317 μm/rok.



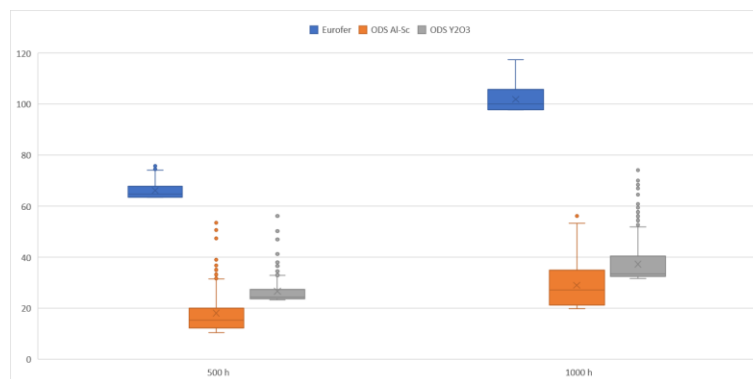


Obr. 2: Korozní poškození Sc-Y-ODS po 1000 h expozice

Oxidy Y, Ti apod. se v ODS ocelích používají zejména za účelem zlepšení mechanických vlastností původního materiálu. Hliník ve správné koncentraci by bylo možné použít pro zvýšení schopnosti povrchu vytvářet ochrannou oxidickou vrstvu. Al-Sc-Y-ODS ocel obsahovala 1 % Al, což se ukázalo jako nedostatečné pro zabránění internímu poškození materiálu. Při hodnocení řezu se ukázalo, že v průběhu expozice dochází k minimálnímu vzniku vnějšího oxidu, a naopak se zvětšila velikost plochy zasažené SBA. Stejně jako v případě Sc-Y-ODS oceli i tady EDS analýza potvrdila difuzi Cr a v tomto případě i Al k povrchu. Přítomnost Sc a Y snižuje schopnost legujících prvků se rozpouštět v HLM prostředí. Dochází ke vzniku nehomogenní vrstvy Pb+Cr oxidu a Cr-O a Al-O pod povrchem (viz obr. 3). Na základě získaných výsledků lze předpokládat, že obsah Al v ODS oceli nebyl dostatečný, aby zcela zabránil degradaci materiálu. Měření korozních úbytků ovšem ukázalo, že modifikace složení a struktury minimalizovalo celkové rozpouštění a korozní rychlost Al-Sc-Y-ODS po 1000 h expozice odpovídala 260 μm/rok.



Obr. 3: Korozní poškození Al-Sc-Y-ODS po 1000 h expozice



Obr. 4: Statistické vyhodnocení celkového úbytku materiálu

Aby bylo možné definovat korozní odolnost ocelí v prostředí HLM, bylo potřeba stanovit celkový úbytek materiálu, ze kterého je možné následně stanovit korozní rychlosti. Celkový úbytek materiálu byl stanoven součtem úbytku materiálu během expozice (měření tloušťky před a po expozici) a průměrné hodnoty vnitřního poškození. Statistické vyhodnocení je uvedeno v grafu na obr. 4 a je z něj zřejmé, že ODS-Eurofer měl vyšší odolnost proti degradaci v prostředí HLM. Korozní rychlost Al-Sc-Y-ODS byla více než třikrát nižší než u Eurofer-97.

## Závěr

Práce se věnovala studiu chování Eurofer-97 v prostředí HLM a vlivu jejího složení na korozní odolnost. Vyhodnocení korozního poškození a stanovení úbytků a korozní rychlosti potvrdilo, že ODS oceli zpevněné oxidy Sc, Y a Al mají jiný charakter poškození a zároveň u nich došlo k výraznému snížení korozní rychlosti.

Během prvních 500 h expozice byla korozní rychlost vyšší a následně bylo patrné její snížení u všech studovaných ocelí. V případě Sc-Y-ODS byl pokles korozní rychlosti největší. Ze statistického vyhodnocení dat je zřejmé, že Sc-Y-ODS měla 2,5krát nižší korozní úbytky než Eurofer-97 a Al-Sc-Y-ODS měla dokonce více než 3krát menší korozní úbytky. Zvýšením obsahu Al by pravděpodobně bylo možné zlepšit oxidační schopnosti a povrch by mohl být víc chráněný před vznikem směsových oxidů obsahujících Pb.

## Acknowledgements

This project is funded by the European Union under grant agreement No 101061241.

Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

## Literatura

- [1] HARY, B. - LOGÉ, R. - RIBIS, J. - MATHON, M. H. - VAN DER MEER, M. - BAUDIN, T. - DE CARLAN, Y. Strain-induced dissolution of Y–Ti–O nano-oxides in a consolidated ferritic oxide dispersion strengthened (ODS) steel. *Materialia*, 2018, vol. 4, p. 444-448, doi:10.1016/j.mtla.2018.11.002
- [2] HOFFMANN, J. - RIETH, M. - LINDAU, R. - KLIMENKOV, M. - MÖSLANG, A. - SANDIM, H. R. Z. Investigation on different oxides as candidates for nano-sized ODS particles in reduced-activation ferritic (RAF) steels. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 442, p. 444-448, doi: 10.1016/j.jnucmat.2013.09.008
- [3] OKABE, T. H. - DEURA, T. N. - OISHI, T. - ONO, K. - SADOWAY, D. R. Thermodynamic properties of oxygen in Yttrium-Oxygen solid solutions. *Metallurgical and Materials Transactions 27B*, 1996, p. 841-847.
- [4] AUGER, M. A. - DE CASTRO, V. - LEGUEY, T. - TARCÍSIO-COSTA, J. - MONGE, M. A. - MUÑOZ, A. - PAREJA, R. Effect of yttrium addition on the microstructure and mechanical properties of ODS RAF steels. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, vol. 455, p. 600-604, doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.040
- [5] KUMAR, D., PRAKASH, U., DABHADE, V. V., LAHA, K., SAKTHIVEL, T. Influence of Yttria on Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Ferritic Steel. In: *ICMPC 2017, Materials Today*. 2018, vol. 5, p. 3909-3913.
- [6] TAN, L. - YANG, Y. - BUSBY, J. T. Effects of alloying elements and thermomechanical treatment on 9Cr reduced activation ferritic-martensitic (RAFM) steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 2013, p. S13-S17.
- [7] HUSAK, R. - HADRABA, H. - CHLUP, Z. - HECZKO, M. - KRUML, T. - PUCHY, V. ODS EUROFER Steel Strengthened by Y-(Ce, Hf, La, Sc, and Zr) Complex Oxides. *Metals*, 2019, vol. 9, paper 1148.

## POŽADAVKY NA REALIZACI ZKOUŠEK NÍZKOCYKLOVÉ ÚNAVY V KOROZNÍM PROSTŘEDÍ

### REQUIREMENTS FOR PERFORMING LOW-CYCLE FATIGUE TESTS IN A CORROSIVE ENVIRONMENT

Ivana Schnablová, Vojtěch Smola, Miroslav Pejša a Radim Kopriva

ÚJV Řež, a. s.

#### Abstrakt

V rámci procesů řízení životnosti průmyslových komponent je nutné vzít v úvahu působení veškerých provozních degradačních mechanismů. Komponenty vystavené za provozu působení cyklického namáhání, zvýšených teplot a účinku korozního prostředí je nutné hodnotit i z hlediska možného únavového poškození. Experimentální hodnocení únavového poškození, zejména nízkocyklové únavy (NCÚ) v prostředí, je realizováno prostřednictvím autoklávových korozně-mechanických zkoušek, které jsou prováděny v souladu se zvýšenými normativními požadavky na přesnost měření veškerých parametrů. Příspěvek je zaměřen na shrnutí veškerých požadavků pro získání přehledu a komplexnosti realizovaných experimentů.

#### Abstract

It is necessary to consider the activity of all operational degradation mechanisms within the lifetime management processes of industrial components. Components exposed to cyclic stress, high temperatures, and corrosion environment must also be evaluated for possible fatigue damage. Autoclave corrosion-mechanical tests are used to evaluate fatigue damage, especially low-cycle fatigue in the environment. These tests require high accuracy in measuring all parameters according to norms. The article summarizes the requirements for obtaining an overview and the complexity of implemented experiments.

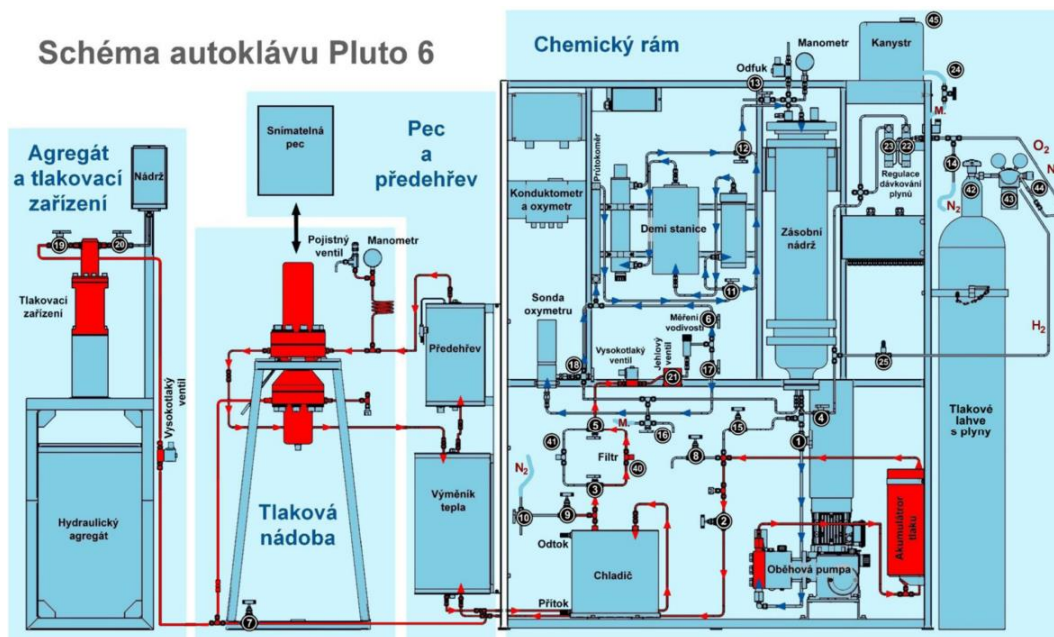
#### Konstrukční řešení autoklávů pro korozně-mechanické zkoušky NCÚ

Oddělením Mechanických a korozních vlastností společnosti ÚJV Řež, a. s. jsou realizovány zkoušky nízkocyklové únavy v korozním prostředí pomocí dvou autoklávů Pluta 2 a Pluta 6. Schéma zařízení autoklávu Pluta 6 je zobrazeno na obr. 1. Hlavními konstrukčními prvky zařízení jsou agregát a tlakovací zařízení, pec a přehřev, tlaková nádoba a chemický rám. Zkoušky nízkocyklové únavy na autoklávech v ÚJV Řež, a. s. lze provádět ve vodním či plyném prostředí.

##### Základní technické parametry autoklávu Pluta 6

- V uzavřeném autoklávu (se zkušebními médii) provozní pracovní tlak do **12,5 MPa**,
- nejvyšší provozní tlak – **14 MPa**,
- nastavení pojišťovacího ventilu – **14 MPa**,
- maximální provozní teplota do **320 °C**,
- parametry jsou uvedeny jako maximální s ohledem na rovnovážnou křivku „voda-pára“
- vnitřní objem zkušebního prostoru autoklávu je cca **0,7 dm<sup>3</sup>**,
- průtok média s ohledem na tepelnou kapacitu hlavní elektrické pece je max. **2 l/hod**.

Princip zatěžování zkušebního tělesa v autoklávu Pluto 6 je založen na rozdílu tlaků nad a pod vlnovcem, ke stanovení zatěžující síly pak slouží přepočtení daných tlaků, čímž je nahrazeno přímé měření zatěžující síly pomocí siloměru, který konstrukční řešení nezahrnuje. Ke vzniku tlaku nad vlnovcem je využíváno oběhové pumpy (vodní médium) či tlakové láhve (režim na vzduchu). Tlak pod vlnovcem je tvořen hydraulicky tlakovacím zařízením. V případě vodního prostředí je nutné napojit zařízení na průtoční vodní smyčku, pomocí které jsou řízeny chemické parametry média v celém autoklávu.

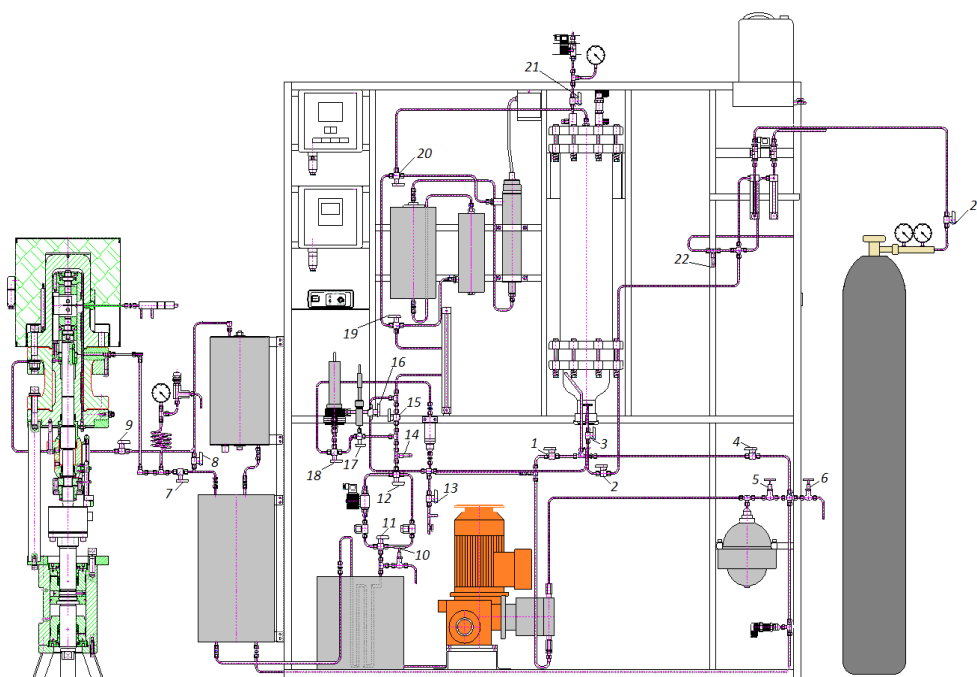


Obr. 1: Schéma zařízení autoklávu Pluto 6

Konstrukční uspořádání Pluta 2 se významně liší od Pluta 6, což dokládá obr. 2, na němž je zobrazeno schéma Pluta 2. Autokláv Pluto 2 se skládá z tlakové nádoby stabilní s hydraulicky zatěžovanou tažnou hřídelí (není obsažen vlnovce), smyčkou, osobním počítačem, řídicí jednotkou, rozvaděčem a hydraulickým agregátem.

#### Základní technické parametry autoklávu Pluta 2

- V uzavřeném autoklávu (se zkušebními médii) provozní pracovní tlak do **12,5 MPa**,
- maximální zatěžovací síla **20 kN**,
- maximální provozní teplota do **325 °C**,
- maximální průtok zkušebního média **6 l/h**.



Obr. 2: Schéma zařízení autoklávu Pluto 2

## Princip autoklávů Pluta 6 a Pluta 2

Tlaková nádoba autoklávu Pluta 6 je tvořena dvěma nádobami, v nichž jsou dvě tlakově oddělené prostory – prostor pod a nad vlnovcem. Tlaková nádoba je složena ze tří částí (horní, střední a dolní). Zkušební těleso je umístěno v horní části nádoby, kde je upevněno ke dvěma závěsům (zespod a seshora). Horní závěs je upevněn k autoklávu, naopak dolní závěs je pevně spojen s tažnou hřídelí, jež je na druhém konci v dolní části nádoby připevněna k vlnovci. Střední částí pomocí oběhové pumpy či tlakem plynu z tlakové láhve je přiváděno zkušební médium ke zkušebnímu tělesu, čímž je vytvářen tlak v části nad vlnovcem. Tlak v dolní části je způsoben přívodem tlakovacího média (demineralizovaná voda) pod vlnovec pomocí hydraulického agregátu a tlakovacího zařízení. Médium necirkuluje, nýbrž je tlačeno do slepé větve, kde je umístěn vysokotlaký ventil, jenž se v případě náhlého výpadku hydraulického agregátu uzavře, čímž se tlak ve větvi udrží. Vlnovec je schopen přenášet značné deformace (natažením či smrštěním). Pokud je tlak nad vlnovcem menší než pod vlnovcem, dochází ke smrštění vlnovce a zkušební těleso je zatěžováno do tlaku. V opačném případě, kdy je tlak pod vlnovcem nižší, se vlnovec natahuje a zkušební těleso je zatěžováno do tahu.

Pluto 2 na rozdíl od Pluta 6 neobsahuje vlnovec, nýbrž hydraulický píst, který je přes siloměr spojen s tažnou hřídelí. Tlak kapaliny (oleje) umožňující pohyb pístu je generován pomocí hydraulického agregátu. Tlak média je tvořen pomocí oběhové pumpy umístěné ve vnější tlakové smyčce autoklávu.

### Měření posuvu

Posuv autoklávu P6 je měřen vnitřním čidlem posuvu (VČP), jedná se o indukční čidlo LIN16/1756, S. No. 1049 výrobce RPD Electronics Ltd. Pevná cívka čidla je umístěna v ose nad zkušebním tělesem. Pohyb spodní části ZT je přenášen bez odporu pomocí tyček na jádro VČP, které se volně posouvá do cívky VČP. Deformace pracovní části ZT je určována výpočtem z naměřených hodnot posuvu, k výpočtu deformace je nutné znát tzv. kalibrační konstanty.

U autoklávu P2 jsou k měření posuvu použita dvě čidla posuvu (vnější a vnitřní). Vnitřní čidlo posuvu je během experimentu uloženo uvnitř autoklávu a měří posuv v oblasti zahrnující vzorek a jeho uchycení. Naopak vnější čidlo posuvu je umístěno na vnější straně autoklávu a měří posuv oblasti zahrnující vzorek, jeho uchycení i tažnou hřídel. Vnější čidlo posuvu slouží k elektrohydraulickému řízení jako přímá ostrá zpětná vazba zamezující nadměrnému růstu posuvu nad limitující meze.

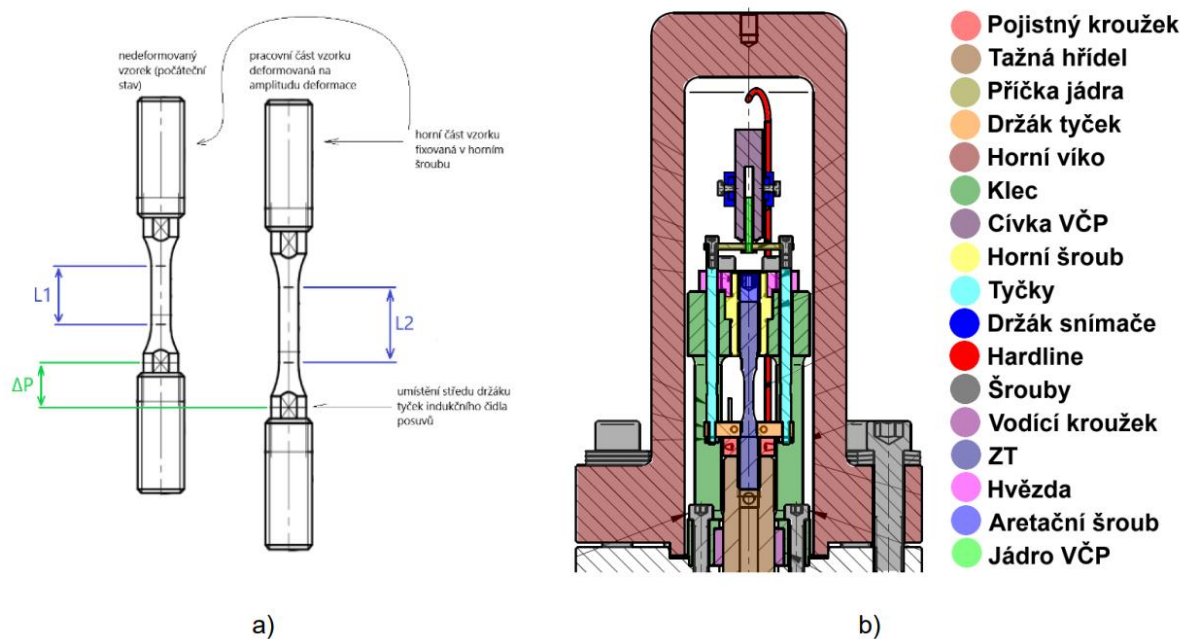
### Stanovení kalibračních konstant pro zkoušky nízkocyklové únavy v prostředí

Vzhledem k tomu, že u zkoušek NCÚ v prostředí není posuv pouze na pracovní části ZT, ale naměřený posuv je složen z deformace pracovní části, šroubení a přechodu do pracovní části, je potřeba naměřenou hodnotu převést na deformaci pracovní části ZT. Schématické zobrazení ZT a umístění držáku tyček indukčního čidla je uvedeno na obr. 3. Na tomtéž obrázku je schématicky označeno odečítání posunutí indukčním čidlem, označeno jako  $\Delta P$ . Dále je zde patrná deformace pracovní části, jejíž délka je v nedeformovaném stavu označena jako  $L_1$  a ve stavu při deformaci jako  $L_2$ . Hodnota  $L_2$  odpovídá dosažené maximální nebo minimální deformaci (úvrati), protože KK se stanovují pouze pro maximální a minimální deformaci na cyklu. Pomocí veličin  $L_1$ ,  $L_2$  a  $\Delta P$  lze stanovit KK, které slouží k tomu, aby v průběhu zkoušky NCÚ byla dosažena požadovaná amplituda deformace  $\varepsilon_a$ . Přesněji řečeno, kalibrační konstanta KK slouží k přepočtu posuvu  $\Delta P$  měřeného indukčním čidlem posuvů na prodloužení pracovní části vzorku  $\Delta L = L_2 - L_1$ , resp. deformaci pracovní části vzorku  $\Delta L / L_1$ .

Na autoklávu Pluto 6 se používá totožná hodnota kalibrační konstanty pro tah i tlak, při změně amplitudy deformace však kalibrační konstanta nabývá rozdílné hodnoty. Kalibrační



konstanta může být závislá i na materiálu ZT. V případě Pluta 6 jsou kalibrační konstanty určovány pomocí videoextenzometru. Významný rozdíl mezi Plutem 6 a Plutem 2 je v tom, že u Pluta 2 lze pro zatěžování zkušebního tělesa v průběhu měření KK použít stejný systém zatěžování, jenž je využíván pro zatěžování ZT při experimentech. Stanovení KK lze také i pomocí metody konečných prvků (MKP), nicméně v tomto případě je nutné experimentálně získat mechanické vlastnosti materiálu (Youngův modul pružnosti  $E$ , mez kluzu zkoušeného materiálu  $R_{p0,2}$  a stabilizovanou širokou hysterezní smyčku).



Obr. 3: Schématické znázornění ZT a popis jednotlivých částí:  
a – vyobrazení uložení ZT; b – řez autoklávem Pluta 6

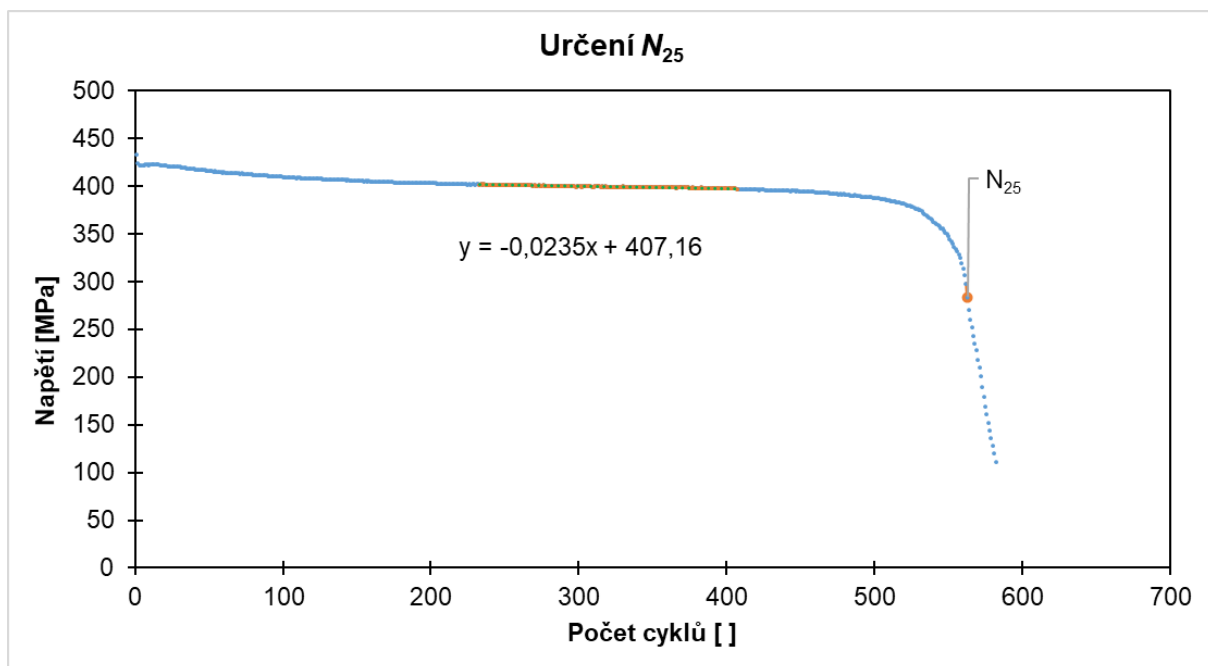
### Normativní porovnání zkoušení nízkocyklové únavy v korozním prostředí

Při přípravě zkoušky nízkocyklové únavy v korozním prostředí lze vycházet buď z normy ČSN EN ISO 11782-1 [3] či například z americké ASTM E606/E606M-21 [4]. Oběma normami jsou předepsány doporučené požadavky na geometrii ZT. Pro ČSN platí minimální průměr ZT 5 mm, délka ZT není specifikována. ASTM doporučuje minimální průměr 6,35 mm a délku ZT rovnou dvaceti násobku průměru ( $\pm 4d$ ). Významné požadavky mají normy na cyklování. ČSN vyžaduje zatěžování a odlehčování se sinusovým, trojúhelníkovým či čtvercovým průběhem. ASTM doporučuje, aby cyklování probíhalo mezi konstantními limity deformace s odchylkou 1 %, frekvence a rychlost deformace by měly být dostatečně nízké, aby se předešlo zahřátí vzorku o více než 2 °C, všechny zkoušky by měly začít ve stejném směru (tah či tlak) a maximální ohybové namáhání nesmí překročit 5 % z minimální osově deformace. Na oddělení Mechanické a korozní vlastnosti (ÚJV Řež, a. s.) při zkoušení nízkocyklové únavy se vychází převážně z normy ČSN ISO 12106 [5], kde jsou dokumentovány požadavky týkající se například zkušebních vzorků (doporučená geometrie pro konkrétní polotvary jako jsou kruhové tyče či ploché výrobky, způsob obrábění, skladování a manipulace zkušebních těles, apod.), zkušební zařízení (snímač síly musí mít vysokou osovou a příčnou tuhost, upínací zařízení musí přenášet cyklické zatěžující síly na zkušební vzorek bez vůle ve směru jeho podélné osy, součástí je i kontrola sousostí, měření deformace, ohřívací zařízení s měřením teploty či počítač cyklů), postup měření či vyjádření výsledků s jejich následnou analýzou.

## Vyhodnocení zkoušek nízkocyklové únavy v korozním prostředí

Jak již bylo zmíněno výše, u autoklávů Pluto 6 a Pluto 2 se postupuje při vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 12106 [3]. V normě je uvedeno, že na začátku zkoušky je nutné provést nepřetržitý záznam počáteční hysterezní smyčky, respektive závislost napěťové odezvy na řízené deformaci. Při zkoušce pak stačí pouze periodický záznam hystereze. V úvodu zkoušky je nezbytné správně odhadnout přibližnou dobu zkoušky, díky čemuž jsou nastaveny frekvence těchto záznamů. Běžným přístupem je záznam prvních deseti cyklů s následným logaritmickým přírůstkem (20, 50, 100, 200, 500, atd.). Zkouška bývá ukončena, pokud jsou splněny podmínky kritéria ukončení, která jsou na začátku zkoušky stanovena. V případě ukončení zkoušky před dosažením kritéria ukončení, je nutné před vyjmutím zkušebního tělesa přezkoumat naměřená data, pokud došlo k předčasnému ukončení, může být zkouška znovu spuštěna. Při zkouškách za vysokých teplot musí být vypnuta pec ihned po ukončení zkoušky, aby se zamezilo oxidaci vzorku a popraskaných povrchů s ohledem na fraktografické měření, které bývá součástí analýzy.

Cílem zkoušek NCÚ prováděných na Plutu 6 a Plutu 2 je získání počtu cyklů do porušení  $N_{25}$ , kde 25 značí procentuální pokles síly od počátku měření, což dokumentuje obr. 4, kde lze vidět vyhodnocení této hodnoty. V závislosti na této hodnotě je volena i prahová hodnota síly, která slouží jako kritérium pro ukončení zkoušky (musí být nižší, aby nedošlo k předčasnému ukončení zkoušky před dosažením  $N_{25}$ ). Výpočet hodnoty  $N_{25}$  vychází z měření maximálního napětí  $\sigma_i$  na ZT v každém zatěžovacím cyklu (viz. obr. 4). Hodnota  $N_{25}$  je pořadové číslo prvního cyklu, při němž je hodnota  $\sigma_i \leq 0,75 \times (k_1 x_i + k_0)$ , kde  $k_1$  resp.  $k_0$  jsou první resp. nulový koeficient regresní přímky proložené maximy napětí  $\sigma_i$  v zatěžovacích cyklech s pořadovými čísly  $x_i$ , kde  $i = a, a + 1, \dots, b$ , které byly vykonány v páté až sedmé desetíně testu. Je to tedy pořadové číslo cyklu, při kterém dojde k 25% poklesu maxima napětí  $\sigma_i$  oproti regresní přímce  $p: \sigma = k_1 x + k_0$ , kde  $\sigma$  je napětí na ZT a  $x$  je pořadové číslo cyklu. Regresní přímka  $p$  je získána metodou nejmenších čtverců.



Obr. 4: Stanovení počtu cyklů do porušení  $N_{25}$  při zkoušce NCÚ v prostředí (Pluto 6, Pluto 2 – ÚJV Řež, a. s.)

## Literatura

- [1] SCHNABLOVÁ, Ivana. *Zkouška nízkocyklové únavy v prostředí – mezilaboratorní porovnání ÚJV Řež, a. s. a JRC Petten na materiálu Sv04Ch20N10G2B*. Praha, 2023, výzkumná zpráva, DITI 2303/340.
- [2] BOUČEK, Václav. *Porovnání experimentálních zařízení pro zkoušky nízkocyklové únavy v prostředí – Pluto 2, Pluto 6 a Autoclave 1*. Praha, 2022, technická zpráva, DITI 2306/108.
- [3] ČSN. *EN ISO 11782-1, Korozní únavy kovů a slitin – Zkoušení korozní únavy – Část 1: Zkoušky cyklováním do porušení*. Praha, Český normalizační institut, technická norma, 2009.
- [4] ASTM. *Standard ASTM E606/E606M, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*. Standard, ASTM International, ASTM E606/E606M, 2021.
- [5] ČSN. *EN ISO 12106, Kovové materiály – Zkoušení únavy – Metoda řízení osově deformace*, Praha, Český normalizační institut, technická norma, 2018.

## KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ KOTLOVÝCH TRUBEK POMOCÍ VIZUÁLNÍ A KAPILÁRNÍ METODY NDT

### INSPECTION OF WELDED JOINTS OF BOILER TUBES USING VISUAL AND PENETRATION NDT METHODS

Vilém Šafařík <sup>a), b)</sup>, Zbyněk Bunda <sup>a), b)</sup>, Dominik Fink <sup>a), b)</sup> a Josef Volák <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> ZČU v Plzni, RTI, Univerzitní 22, 30100 Plzeň

<sup>b)</sup> JCT service s.r.o., Mladotice 24, 33141

#### Abstrakt

Příspěvek se zabývá defekty vyskytujícími se ve svarových spojích, které byly pozorovány při generální opravě kotle při odstávce. Pro kontrolu svarů bylo v rámci projektu využito vizuální a penetrační metody. Jedná se o zejména o svary trubek membránových stěn a také o svary potrubí pro přívod spalovacího vzduchu. Popsány jsou nalezené vady svarů včetně jejich fotodokumentace. Cílem tohoto článku je poukázat na opakující se vady ve svarech, zejména při výměně panelů membránových stěn v kotlích, a tím přispět k předcházení vzniku těchto nehomogenit.

#### Abstract

The article discusses weld joint defects that were observed during boiler overhaul during shutdown. Visual methods as well as penetration methods were used in the project to check welds. These are mainly the welds of membrane wall pipes and the welds of pipes for the supply of combustion air. Found weld defects are described and also their photo documentation is included. The aim of this article is to point out recurring defects in welds, especially when replacing membrane wall panels in boilers, and thereby contribute to the prevention of these inhomogeneities.

#### Předmět a popis kontroly

Předmětem kontroly byly tupé svarové spoje (BW) trubek a praporků membránových stěn výparníku ve spalovacích komorách elektrárny zhotovené metodou svařování 141 (TIG) a konstrukce přívodu spalovacího vzduchu do spalovací komory zhotovené metodou 111 (svařování obalovanou elektrodou). Svarové spoje byly provedeny řádně proškoleným personálem s platným oprávněním pro danou metodu svařování v souladu s EN normami (např. ČSN EN ISO 9606-1) pod trvale přítomným svářečským dozorem. Trubky byly nahrazovány v rámci rekonstrukce uhlénoho kotle energetického zařízení dle příslušného svařovacího plánu. Cílem kontroly bylo zajištění stupně přípustnosti 2X dle ČSN EN ISO 23 277 (PT) a stupně kvality B podle ČSN EN ISO 5817 (VT). Veškerý NDT personál byl dále ve zmíněných metodách certifikován nejméně ve stupni II v souladu s ČSN EN ISO 9712.

#### Postup kontroly

Po kompletním vyhotovení svarových spojů byla provedena 100% VT kontrola plochy svarového spoje a 10 mm základního materiálu na obě strany od svarového spoje dle ČSN EN ISO 17637 za použití umělého zdroje osvětlení o minimální hodnotě 350 lx. Jednalo se o metodu přímou místní s minimálním pozorovacím úhlem 30° a maximální pozorovací vzdáleností 600 mm. V případě, že vizuální kontrolou byly svarové spoje vyhodnoceny jako vyhovující pro příslušný stupeň kvality, bylo postoupeno k dalším NDT metodám, v tomto případě PT.

Metodou PT dle ČSN EN ISO 3452-1 byla taktéž provedena inspekce 100 % plochy svarového spoje. Pro PT metodu NDT byly využity dvě varianty chemikálií různých z hlediska aplikace. První variantou byly chemikálie balené v kanystrech, které byly nanášeny na předem očištěný povrch pomocí štětců a stříček. Druhou variantou byly chemikálie ve sprejích. Využití

těchto variant se lišilo v závislosti na lokalitě kontroly. Postup aplikace chemikálií (čističe, penetrantu a vývojky) byl pak v souladu s normou ČSN EN ISO 3452-1 i jednotlivými technickými listy chemických prostředků.

### Vady, jejich detekce a nápravná opatření

S ohledem na metodu svařování, lokalitu svarových spojů, geometrii konstrukce a zkušenosti svářečského personálu, se kvalita jednotlivých svarových spojů značně lišila. Nejvýraznější rozdíl pak způsobovala právě metoda svařování, kdy metoda 111 vykazovala obecně horší kvalitu než metoda 141. V případě, že vada byla vyhodnocena jako nepřijatelná, postupovalo se v souladu s normami a daná skutečnost byla neprodleně oznámena přítomnému svářečskému dozoru, který zjednal další nápravná opatření. Při opětovné NDT kontrole nebyly tyto vady zpravidla dále pozorovány.

#### Nejčastější vady vzniklé metodou 141, možné příčiny a jejich eliminace

Dle ČSN EN ISO 5817 – st. kvality B byly ve svarových spojech membránových stěn výparníku z vnitřní i vnější strany nejčastěji pozorovány tyto vady:

- 100 – Trhlina – Tato vada vznikala nejčastěji na rozhraní starých částí membránových stěn a nově instalovaných panelů v oblasti praporků. Důvodem vzniku těchto trhlin bylo vtažení nečistot z povrchu starých membránových stěn do svarové lázně. Tyto nečistoty při tuhnutí svarového kovu velmi často způsobovaly trhliny různých délek jak v provedených svarech, tak v tepelně ovlivněné oblasti. Těmto vadám se dá vyhnout dostatečným očištěním povrchů svařovaných součástí.



Obr. 1: Trhlina na rozhraní staré části membránové stěny a nově přivařeného panelu

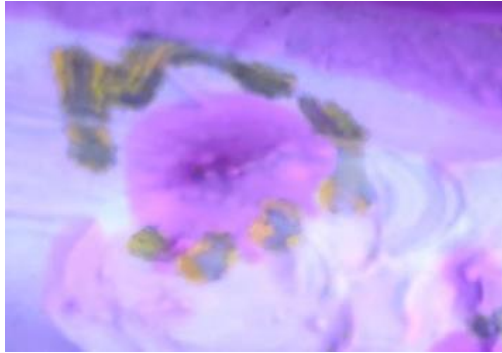
- 5011 – Souvislý zápal – Tato vada mohla vzniknout zvolením nevhodných parametrů: vysoké napětí na oblouku, pochybením svářečského personálu, konkrétně špatným úhlem svařovací hubice a nedostatečným zásobením přídavného materiálu.



Obr. 2: Souvislý zápal

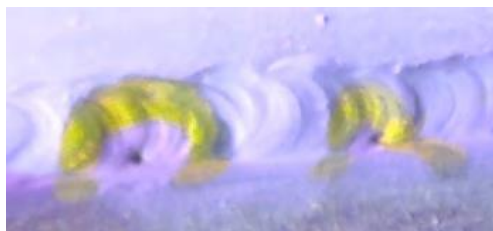
- 104 – Kráterová trhlina – Vada způsobená náhlým ukončením svařovacího procesu a nedostatečným přísunem přídavného materiálu v kombinaci s vysokou rychlostí ochlazování svarové lázně.





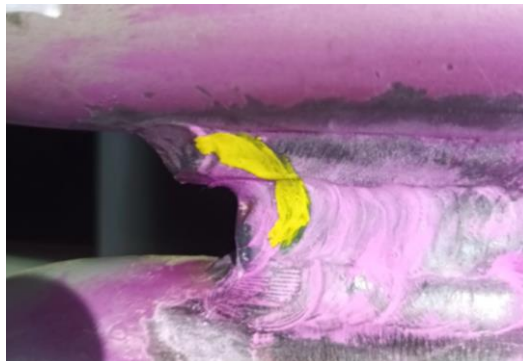
Obr. 3: Kráterová trhlina

- 2017 – Povrchový pór – Vada způsobená náhlým omezením přísunu ochranného svařovacího plynu, přítomností maziva, nebo přítomností vlhkosti a nečistot na svařovém úkosu.



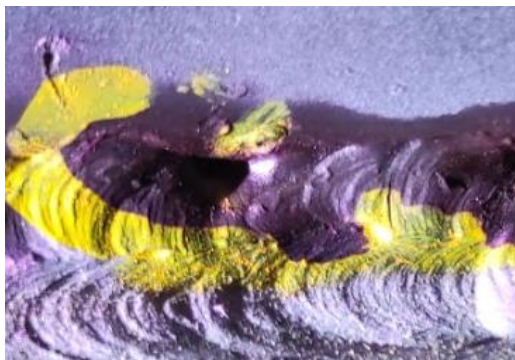
Obr. 4: Povrchový pór

- 2025 – Koncová kráterová staženina – Vada způsobená vlivem vzniku dutiny při tuhnutí svařové lázně po ukončení svařovacího procesu za nedostatečného přísunu přídavného materiálu, nebo příliš rychlým ukončením svařovacího procesu.



Obr. 5: Koncová kráterová staženina

- 511 – Neúplné vyplnění svaru – Vada způsobená nedostatečným přísunem přídavného materiálu, pochybením svářeče, nebo nedodržením postupu svařování.



Obr. 6: Neúplné vyplnění svaru

### Nejčastější vady vzniklé metodou 111, možné příčiny a jejich eliminace

Dle ČSN EN ISO 5817 – st. kvality B byly na konstrukci přívodu spalovacího vzduchu nejčastěji pozorovány tyto vady:

- 602 – Rozstřík – Je mnoho možností vzniku této vady. Nejčastějším důvodem bývá příliš vysoké napětí na oblouku, špatné nastavení rychlosti podávání drátu, nebo nevhodně zvolená oblast stability hoření oblouku.
- 601 – Dotyk elektrodou – Vada způsobená nedostatečnou pozorností svářeče.



Obr. 7: Dotyk elektrodou

- 512 – Nadměrná asymetrie svaru – Vada způsobená nevhodným výběrem polohy a úhlu natočení elektrody při svařování, nebo nevhodný pohyb s elektrodou v oblouku.



Obr. 8: Nadměrná asymetrie svaru

- 517 – Vadné napojení – Vada způsobená nepozorností svářečského personálu v kombinaci se špatným úhlem svařovacího hořáku a nevhodně zvolenými parametry svařování.

### Závěr

Cílem článku bylo poukázat na často se opakující vady při svařování tlakového celku v praxi. I přes vysoké nároky na personál z hlediska norem je patrné, že přítomná obsluha mnohdy není schopna proaktivně jednat při ohledání vlastní práce, a tím nepředchází následným oficiálním nápravným opatřením. V případě zanedbání NDT kontroly by mohlo dojít k vážným finančním ztrátám provozovatele zařízení, v krajním případě i k ohrožení lidských životů v případě zanedbání nápravných opatření pro odstranění závažných vad.

Je potřeba klást důraz jak na provedení samokontroly svářečem po svařování, tak na důkladnou NDT kontrolu personálem vyškoleným dle ČSN EN ISO 9712. Při NDT kontrolách svarů na kotli se podařilo tyto vady minimalizovat právě díky detailní kontrole svarů a také striktním přístupem při jejich opravách. Odhadem je možné říci, že množství nalezených vad, po kontrole metodami VT i PT na svarech kotle a přívodu spalovacího vzduchu, se díky tomuto přístupu v závěru projektu snížilo zhruba na 10 – 20 %. Hlavním přínosem bylo zvýšení výsledné kvality svarových spojů, snížení nákladů a časové náročnosti při opravách svarů na projektu, kde největší důraz je kladen právě na časovou úsporu.

## HODNOCENÍ KOROZNÍHO CHOVÁNÍ AUSTENITICKÉ OCELI 08Cr18Ni10Ti ZA VYSOKÝCH PARAMETRŮ VODY

### EVALUATION OF CORROSION BEHAVIOR OF AUSTENITIC STEEL 08Cr18Ni10Ti EXPOSED TO HIGH PARAMETERS OF WATER

Monika Šípová a Daniela Marušáková

Centrum výzkumu Řež, s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež

#### Abstrakt

Stále se hledají nové zdroje a způsoby výroby energie a jednou z možných cest jsou jaderné reaktory IV. Generace, kam spadá i superkritickou vodou chlazený reaktor. Tento reaktor využívá provozních zkušeností aktuálně provozovaných lehkých a těžkovodních reaktorů při čemž je u tohoto konceptu navýšena účinnost přeměny energie i díky zvýšení pracovních parametrů. Právě vyšší parametry chlazení byly otestovány u austenitické nerezové oceli 08Cr18Ni10Ti, která je široce používána právě ve východních typech lehkovodních jaderných elektráren. Korozní chování bylo kromě váhových změn hodnoceno na základě výsledků rentgenové difrakce a rastrovací elektronové mikroskopie zahrnující chemické a krystalografické analýzy. Získané výsledky jsou důležité pro další výzkum, protože superkritickou vodu lze úspěšně použít i jako chladivo pro malé modulární reaktory, o které je v současnosti zájem.

#### Abstract

New sources and methods of energy production are still being sought, and nuclear reactors of the IV. Generation are one of the possible ways. This generation also includes a supercritical water-cooled reactor. This reactor can successfully use the operational experience of currently operating light and heavy water reactors, while the efficiency of energy conversion is increased in this concept thanks to the increase of working parameters. Higher parameters of coolant were tested for austenitic stainless steel 08Cr18Ni10Ti, which is widely used in eastern types of light-water nuclear power plants. In addition to weight changes, the corrosion behaviour was evaluated based on the results of X-ray diffraction and scanning electron microscopy including chemical and crystallographic analyses. The obtained results are important for further research, as supercritical water can be successfully used as a coolant for small modular reactors, which are currently of high interest.

#### Úvod

Spotřeba energie stále roste a zároveň je hledána cesta, jak tuto poptávku uspokojit s přihlédnutím na přírodní zdroje a ekologickou výrobu energie. Jedním z možných způsobů výroby je IV. generace jaderných reaktorů. Do této generace patří i superkritickou vodou chlazený jaderný reaktor (SCWR), který využívá provozních zkušeností stávajících jaderných lehkovodních reaktorů (JE) a také fosilních elektráren s výrobními bloky o nadkritických parametrech ( $T_{kritická} = 374 \text{ °C}$  ;  $p_{kritický} = 22 \text{ MPa}$  [1]).

Austenitické korozivzdorné oceli řady AISI 300 jako AISI304, AISI316 jsou typickými konstrukčními materiály pro západní vodní JE typu PWR a BWR. Oproti tomu austenitická ocel 08Cr18Ni10Ti je základním konstrukčním materiálem pro východní JE typu VVER. Pro zmíněné oceli je typická vyšší korozní odolnost díky vyššímu obsahu Cr, a tak lepší pasivaci v prostředí primárního okruhu. Ocel 08Cr18Ni10Ti je navíc legována Ti, který vede ke stabilizaci mikrostruktury v důsledku přednostní tvorby precipitátů bohatých na uhlík a titan, což napomáhá vyšší odolnosti vůči interkrystalické formě korozi a koroznímu praskání.

Příspěvek se zabývá zhodnocením korozního chování zmíněné oceli v prostředí SCW, jejíž parametry byly voleny s ohledem na pracovní podmínky očekávané u SCWR, jak je popsáno

v [2]. Navíc byly expozice realizovány v ultrakritickém modulu superkritické smyčky [3] s vysokým průtokem média podobě jako vysokých parametrech tlaku i teploty.

### Experimentální část

Vzorky oceli 08Cr18Ni10Ti, jejíž složení je uvedeno v tabulce 1, o rozměrech 10 x 10 x 4 mm byly exponovány v prostředí SCW při teplotě 600 °C a tlaku 25 MPa po dobu 430 h.

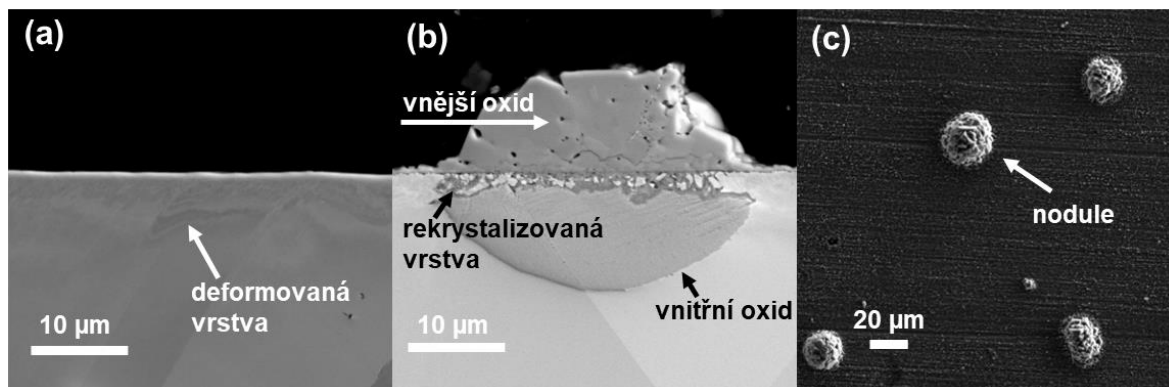
Tab. 1: Chemické složení oceli 08Cr18Ni10Ti [hm. %]

prvky	C	Si	Ni	Cr	Mn	Mo	Co	Ti	W	V	Cu	Fe
Hm. %	≤0.08	≤0.8	9–11	17–19	≤1.5	≤0.3	≤0.05	≥5C–0.6	0.2 max	0.2 max	0.3 max	Bal.

Před expozicí byly vzorky odmaštěny v acetonu a váženy na vahách s přesností 0,00001 g. Po expozici byly vzorky znovu zváženy a korozní odolnost uvedené oceli byla také hodnocena využitím světelné a elektronové mikroskopie z příčného průřezu vzorku. V rámci elektronového mikroskopu (SEM) byly využity analytické metody jako elektronová difraktografie (EBSD) a energiově disperzní spektrometrie (EDS). Složení korozní vrstvy bylo navíc analyzováno i rentgenovou difrakcí (RTG).

### Výsledky a diskuze

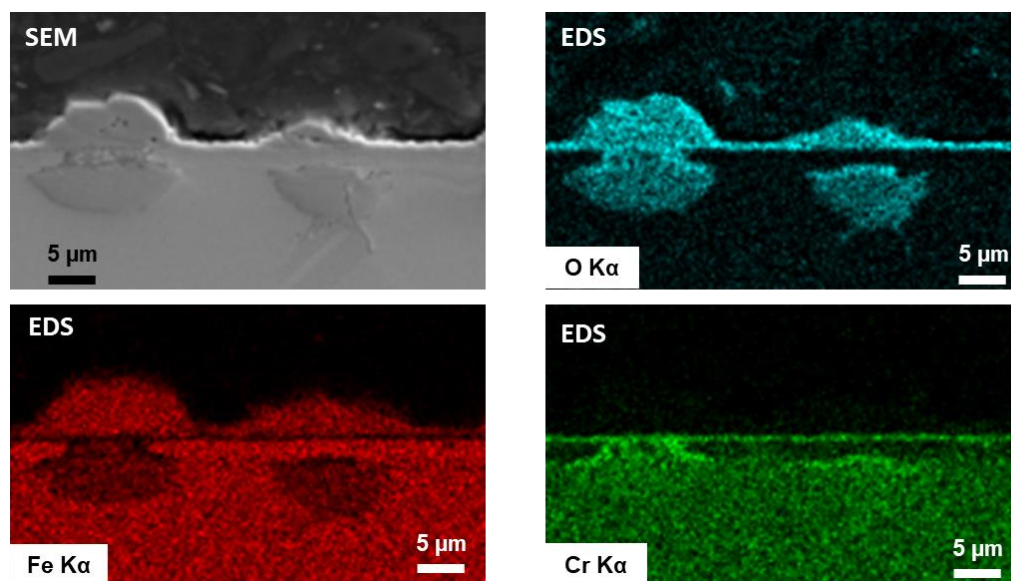
Teplota, povrchová úprava a velikost zrna jsou považovány za klíčové parametry, které ovlivňují korozní chování konstrukčních materiálů v SCW [2]. Menší roli lze přičíst chemickému složení a hustotě SCW. V diskutovaném případě odpovídal povrch vzorku s drsností Ra ~ 0,06 μm leštěnému povrchu a teplota 600 °C je považována za vysokou v případě SCW. V důsledku tvorby oxidické vrstvy během expozice v SCW došlo k nárůstu hmotnosti v průměru o 14,4 mg. Na obr. 1 je vidět nárůst oxidické vrstvy a tvorba nodulí na vzorku vybrané oceli (obr. 1c). Pro nodule je typické, že vystupují z povrchu a zároveň prorůstají dovnitř vzorku díky difúzi kyslíku (obr. 1b, obr. 2). Tvorba nodulí byla v podobných podmínkách pozorována i u oceli AISI 304 [4] či feritické ODS oceli [5]. V případě feritické ODS oceli byla tvorba nodulí přisuzována rozdílné průměrné velikosti zrn, kdy u jemnější struktury byla nižší pravděpodobnost tvorby nodulí.



Obr. 1: Příčný řez (a) výchozího stavu, (b) stavu po expozici a (c) povrch vzorku po expozici (SEM)

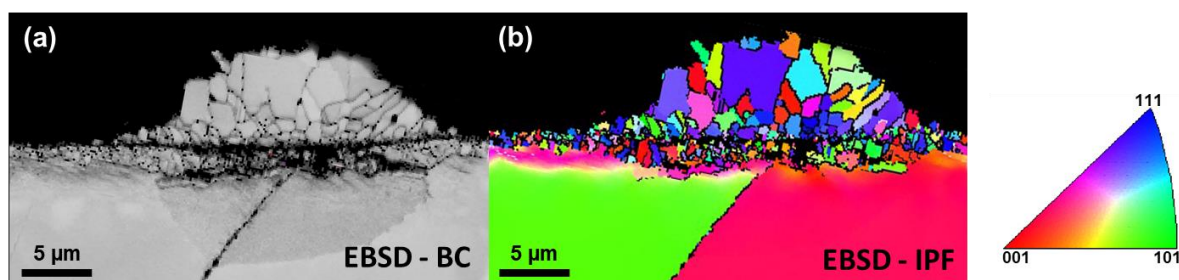
Rentgenová difrakce odhalila, že zatímco vnější oxid nodulí je tvořen spinelem na bázi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, vnitřní tenká oxidická vrstva na povrchu vzorku z oceli 08Cr18Ni10Ti je tvořena oxidem na bázi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tyto výsledky byly dále podpořeny EDS analýzou, jak je ukázáno na obr. 2, kde je zvýrazněna přítomnost vybraných prvků. Podle EDS analýzy na obr. 2 je zřejmá vyšší koncentrace chromu na povrchu vzorku. Oproti tomu je tato vrstva chudá na přítomnost železa, které je zřejmě přítomné ve vnější části nodule.





Obr. 2: EDS mapy zobrazující přítomnost vybraných prvků v řezu oxidickou nodulí

Na obr. 3 jsou ukázány výsledky elektronové difrakce (EBSD). EBSD odhalilo přítomnost jemnozrnné mikrostruktury těsně pod povrchem vzorku (obr. 3b). Podle výsledků chemické analýzy na obr. 2 není v této vrstvě přítomen kyslík v místech, kde nedochází k tvorbě nodulí.



Obr. 3: Výsledky elektronové difrakce řezem oxidické nodule zobrazující (a) fázový kontrast a (b) různou orientaci zrn podle inverzního trojúhelníku

Porovnáním výsledků uvedených na obr. 1a a obr. 3 je zřejmé, že u původní deformované vrstvy přítomné pod povrchem došlo v důsledku expozice a částečného vyčerpání chromu (obr. 2) k rekrystalizaci mikrostruktury. Částečné vyčerpání chromu lze přisuzovat podmínkám expozice, kdy je chrom postupně spotřebováván pro tvorbu ochranné pasivní vrstvy na bázi oxidu  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , který při  $T \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$  v podmínkách SCW může přecházet na těkavý/prchavý (volatile)  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  [2, 6].

### Závěr

Korozní chování austenitické oceli 08Cr18Ni10Ti v prostředí SCW bylo hodnoceno na základě hmotnostních změn a prostřednictvím elektronové mikroskopie a příslušných analytických metod jako EDS a EBSD. Pro popis oxidické vrstvy byla použita RTG.

Výsledky ukázaly, že při expozici v SCW při  $600 \text{ }^\circ\text{C}/25\text{MP}$  dochází u vybrané oceli k tvorbě nodulí a ochuzení vrstvy pod povrchem o chrom. Lokalizovaná forma koroze je nežádoucí a nebezpečná s ohledem na možnou iniciaci korozního praskání [7].

Ocel 08Cr18Ni10Ti se vzhledem k výsledkům jeví jako nevhodná pro použití v podmínkách SCW pro teploty  $\geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Realizace experimentu přispívá k objasnění role stavu povrchu ve vztahu ke zvýšení korozní odolnosti materiálu v prostředí SCW. Navíc použité metody nabízí další možnosti přístupu k charakterizaci mikrostruktury po expozici v náročných provozních



podmínkách. Lze předpokládat, že výsledky pomohou optimalizovat finální úpravu komponent budoucích reaktorů chlazených SCW.

### Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu, který získal finanční prostředky z výzkumného a školícího programu Euratomu na období 2019–2020 na základě grantové dohody č. 945234.

### Reference

- [1] KRYKOVÁ, M. - SCHULENBERG, T. - ARNOULT RŮŽIČKOVÁ, M. - SÁEZ-MADERUELO, A. - OTIC, I. - CZIFRUS, C. - CIZELJ, L. - PAVEL, G. L. European research program on supercritical water-cooled reactor. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2021, vol. 7, p. 1-5. <https://doi.org/10.1115/1.4048901>
- [2] GUZONAS, D., NOVOTNY, R., PENTILLA, S., TOIVONEN, A., ZHENG, W. *Materials and Water Chemistry for Supercritical Water-cooled Reactors, 1st ed.* United Kingdom: Woodhead Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102049-4.00005-2>
- [3] RŮŽIČKOVÁ, M. - HÁJEK, P. - ŠMIDA, Š. - VŠOLÁK, R. - PETR, J. - KYSELA, J. Supercritical water loop design for corrosion and water chemistry tests under irradiation. *Nuclear Engineering and Technology, Special Issue 3rd International Symposium SCWR*, 2007, vol. 40, paper 127132.
- [4] BEHNAMIAN, Y. - MOSTAFAEI, A. - KOHANDEHGHAN, A. - AMIRKHIZ, B. S. - ZAHIRI, R. - ZHENG, W. - GUZONAS, D. - CHMIELUS, M. - CHEN, W. - LUO, J. L. A comparative study on the oxidation of austenitic alloys 304 and 304-oxide dispersion strengthened steel in supercritical water at 650 °C. *Journal of Supercritical Fluids*, 2017, vol. 119, p. 245-260. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.10.002>
- [5] ZHAO, Q. - QIAO, Z. - DONG, J. - YU, L. - LIU, C. – WANG, H. Oxidation behavior analysis of a ferritic ODS steel in supercritical water. *Fusion Engineering and Design*, 2020, vol. 161, paper 111991. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111991>
- [6] ROBERTSON, J. The mechanism of high temperature aqueous corrosion of stainless steels. *Corrosion Science*, 1991, vol. 32, p. 443-465. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(91\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0010-938X(91)90125-9)
- [7] NOVOTNY, R. - HÄHNER, P. - SIEGL, J. - HAUŠILD, P. - RIPPLINGER, S. - PENTTILÄ, S. - TOIVONEN, A. Stress corrosion cracking susceptibility of austenitic stainless steels in supercritical water conditions. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, vol. 409, p. 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.09.018>

# MĚŘENÍ TORZNÍCH VIBRACÍ TELEMETRICKÝMI SYSTÉMY

## MEASUREMENT OF TORSIONAL VIBRATIONS USING TELEMETRY SYSTEMS

Jaroslav Václavík a Radka Musilová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Dynamická zkušebna, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

### Abstrakt

Je proveden úvod do problematiky torzních vibrací na turbogenerátorech. Je popsán princip měření smykového napětí pomocí odporových tenzometrů. Pro tři měřicí systémy jsou uvedeny příklady aplikace měření torzních vibrací.

### Abstract

An introduction to the issue of torsional vibrations on turbogenerators is made. The principle of shear stress measurement using resistance strain gauges is described. Examples of application of torsional vibration measurement are presented for three measuring systems.

### Úvod

Cyklické torzní namáhání rotoru, pokud dosahuje vysokých hodnot, může iniciovat vznik a šíření únavových trhlin. Torzní namáhání má dva typy. Prvním typem je krut přenášený přes vzduchovou mezeru z generátoru, který má statickou složku, odpovídající přenášenému výkonu od turbíny do generátoru a dynamickou složku, odpovídající násobkům frekvence sítě, když je generátor zapojen do sítě a vystaven přechodovým poruchám v síti. Druhým typem torzních vibrací je odezva turbíny na toto buzení v jednotlivých jejích částech, jejíž složky odpovídají torzním vlastním frekvencím jednotlivých částí turbogenerátoru.

Torzní vibrace rotoru způsobují jeho smykové namáhání. Nominální hodnota smykového namáhání může být podstatně zvýšena vlivem koncentrací napětí v místě otvorů, osazení rotoru a v místech dalších změn průřezu. Vysoká napětí mohou být příčinou vzniku a šíření trhlin na rotoru. Torzní kmity a zvláště přechodové děje mohou budít vlastní kmity dalších částí, připojených k rotoru (především lopatek), které při vysoké úrovni napětí mohou být příčinou jejich poškození.

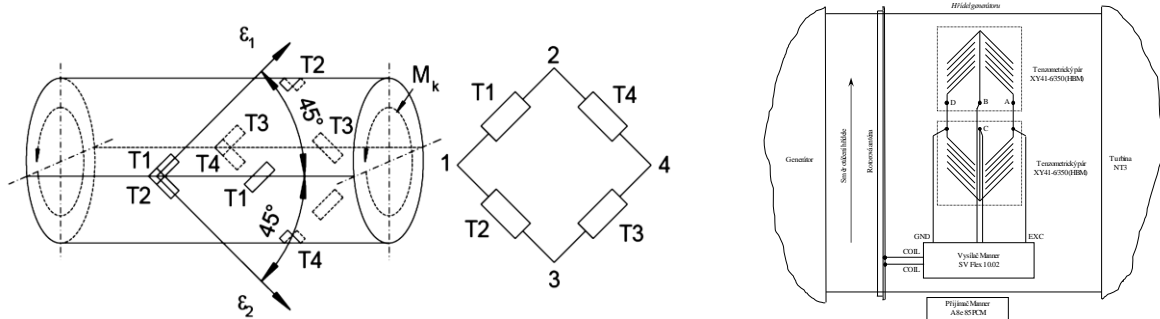
Charakteristickou vlastností torzních vibrací je velmi malé tlumení, které je omezeno téměř výlučně na vnitřní tlumení materiálu rotoru. V důsledku toho mohou torzní kmity při rezonanci nebo při opakovaném vybuzení dosahovat značných amplitud. Riziko spočívá i v tom, že vzhledem k zanedbatelné torzní vazbě mezi rotorem a statorem se torzní vibrace na venek neprojeví a detekovat je lze pouze cíleným měřením.

Mechanismem poškození je většinou vysokocyklová únava akumulací poškozujících cyklů od přechodových dějů. Při řízeném přepínání se většinou nepřekročí 0,5 pu výstupního výkonu stroje. Na základě takových přechodových dějů se rotorový systém únavově nepoškodí a vyčerpá se pouze 0,01 % jeho životnosti na jednu událost. Standard pro elektrické generátory [1] uvádí, že generátor by měl být zkonstruován tak, aby vydržel náhlý zkrat, i když je provozován při 1,05 pu. Tento standard však nepostihuje místní napětí, které se může objevit na turbosoustrojích, pokud má toto vlastní frekvenci v oblasti dvojnásobku frekvence elektrické sítě, kdy se faktor poškození může zesílit až 400x. Proto by vlastní frekvence měly být separovány o 2% interval od první a druhé harmonické složky frekvence sítě [2].

Přínosem monitorování torzních vibrací je schopnost sledovat akumulaci únavového poškození a schopnost stanovit, zda torzní přechodové děje vůbec dosahují takových špičkových hodnot, aby byly schopny způsobit únavové poškození. Dále slouží k informaci personálu elektrárny, že došlo k události, která může mít poškozující účinky a že je potřeba provést opatření, aby nedošlo k nějakému následnému katastrofickému poškození.

## Princip měření smykového napětí pomocí tenzometrů

Torzní vibrace se určují ze zákmitů krouticího momentu  $M_k$  prostřednictvím smykového napětí měřením na povrch rotoru nalepenými odporovými tenzometry T1 až T4 (měřena je poměrná deformace  $\varepsilon$  pod úhlem  $45^\circ$ ) (1).  $D_o$ ,  $D_i$  jsou vnější a vnitřní průměr rotoru a  $E$ ,  $\mu$  jsou materiálové konstanty. Tento princip měří torzní napětí v uzlu mezi dvěma kmitkami.



Obr. 1: Princip měření torze pomocí odporových tenzometrů a realizace na TG ETE

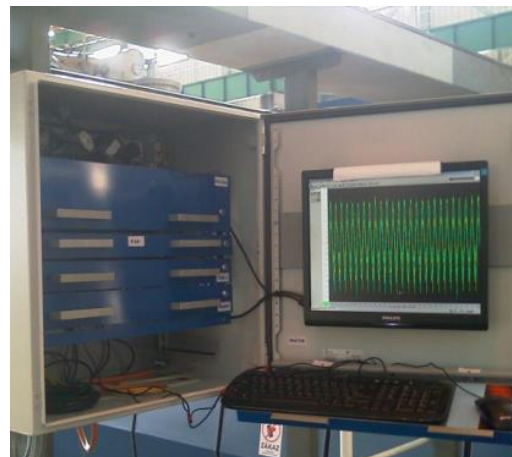
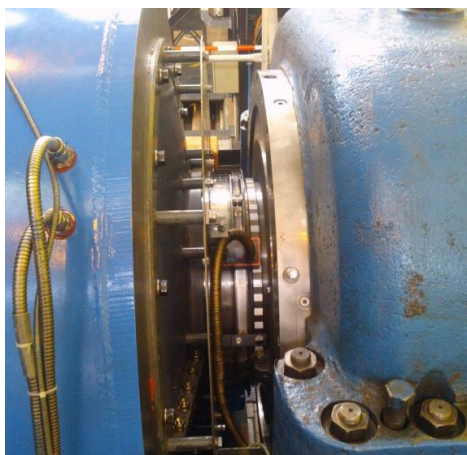
$$M_k = \frac{\pi}{64} \cdot \frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

## Telemetrické měřicí systémy pro měření krouticího momentu a torzních vibrací a jejich aplikace

### Systém s lepenými tenzometry Manner

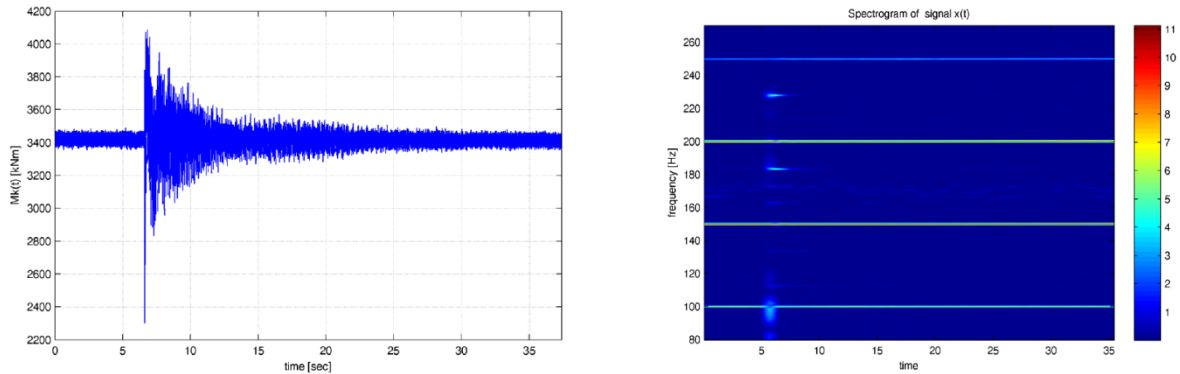
Telemetrické systémy fy. Manner jsou většinou indukční, 1-kanálové s PCM a ethernetovým rozhraním a jsou vybaveny indukčním napájením. Měřicí systém tohoto typu byl instalován na rotor generátoru ETE těsně před spojkou s rotorem nízkotlakého stupně turbíny (obr. 2) [3].

16bitový zesilovač signálu snímače na bázi flexsubstrátu je zde integrován do speciálního čtyřdílného děleného Al kroužku o vnitřním průměru 560 mm, upevněného na hřídeli rotoru osmi šrouby. Měřicí zesilovač má vzorkovací frekvenci 3,4 kHz, šířku pásma 1 kHz; pro účely měření je použit vstupní rozsah 4 mV/V. Kroužek nese jednocívkovou anténu Výkonový a digitální přenos je realizován plochou přijímací anténou. Stacionární přijímací jednotka je instalována ve skříni na strojovně, propojená s přijímací anténou 15 m dlouhým koaxiálním kabelem. Přijímací jednotka umožňuje dálkovou kalibraci bočníku a další ovládání rotorového modulu (zesílení, nula atd.).

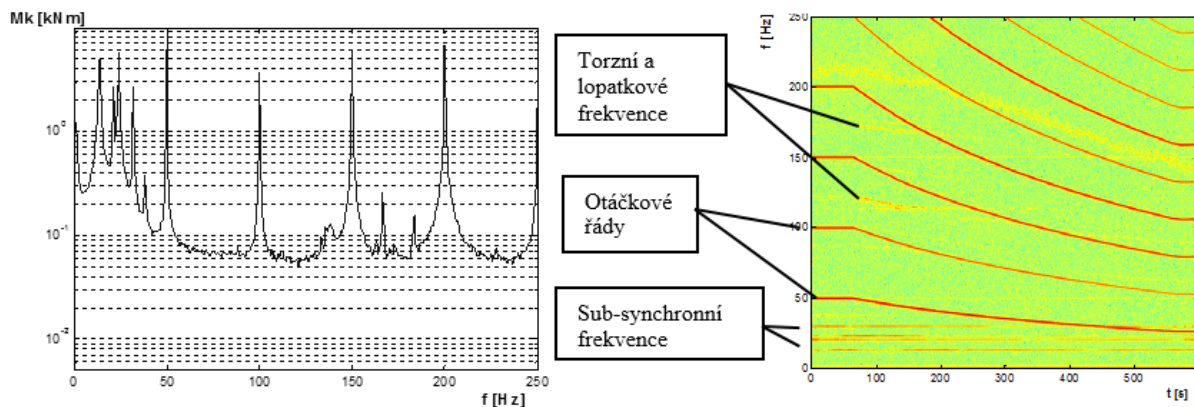


Obr. 2: Instalovaný měřicí systém na rotoru TG ETE (a) a skříň s řídicí jednotkou (b)

Pro tento účel lze telemetrické rozhraní Manner spustit na řídicím počítači těsně před zahájením sběru dat, pro účely údržby nebo pro recalibrace. Data jsou přístupná z analogového výstupu nebo je lze monitorovat digitálně přes rozhraní Ethernet bez využití software Manner. Na obr. 3 je příklad zachycení přechodového děje a jeho spektrogram. Na obr. 4 je amplitudové spektrum a spektrogram při odstávce turbíny ETE TG1.



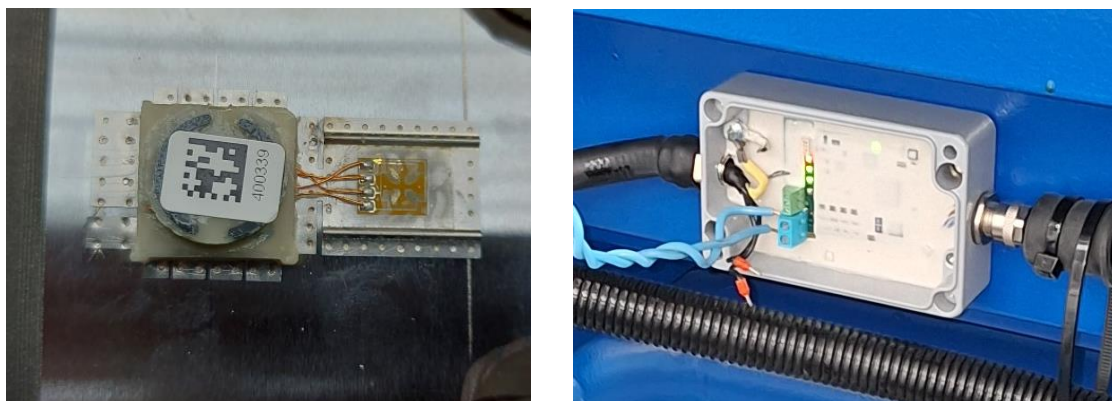
Obr. 3: Příklad torzní reakce na poruchu sítě, časový průběh (a) a spektrogram události (b)



Obr. 4: Amplitudová spectra (a) a spektrogram během odstávky turbíny (b) (ETE, TG1)

#### Systém s přivařeným vysílačem a tenzometry Manner Telma

Tento telemetrický systém má integrovanou tenzometrickou růžici pro měření smykového napětí a měřicí zesilovač v jednom celku o rozměru 35,53 mm x 18,1mm x 6,25 mm. Vše se nachází na tenkém plechu, který se přiboduje na povrch měřeného rotoru (obr. 5a). Napájení a měřicí a řídicí signál se přenáší přes statorovou jednozávitovou anténní smyčku. Statorová průmyslová jednotka s ochranou IP67 je určena pro montáž přímo na měřený stroj (obr. 5b).



Obr. 5: Přibodovaný snímač Telma (a) a průmyslová statorová jednotka s montáží na stroj (b)

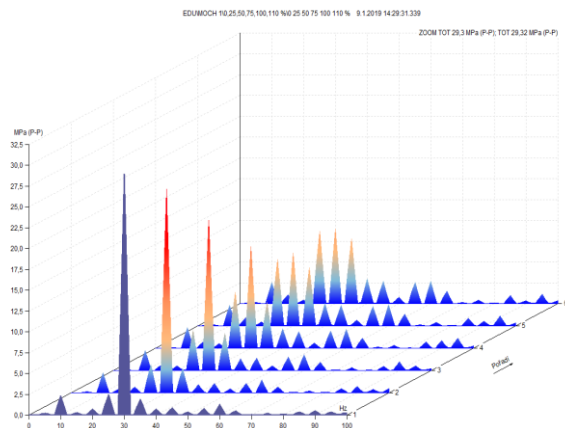


Statorová jednotka má napěťový výstup a USB nebo ethernetové rozhraní. Šířka pásma je 1,2 kHz. Systém byl použit pro monitorování krouticího momentu na vstupním hřídeli převodovky Side Drive.

#### Systém s lepenými tenzometry KMT

Firma KMT nyní pod hlavičkou společnosti IMC, nabízí jedno a více kanálové telemetrické systémy. Zde představujeme 1-kanálový měřicí systém TEL1-PCM-STG s miniaturním rotujícím vysílačem o rozměrech 35 x 18 x 12 mm o šířce pásma 1,2 kHz. Napájení a přenos signálu je také indukční pomocí ploché indukční hlavy. Za tím účelem se na rotoru navine anténa o více závitů. Statorová jednotka nepotřebuje programové řízení. Citlivost i nulování se provádí manuálně na jednotce; výstup je analogový  $\pm 10V$ .

Tento měřicí systém používáme pravidelně pro diagnostiku torzních vibrací záložních dieselgenerátorů na AE Mochovce; měření se v rámci programu předprovozních kontrol provádí jednou za čtyři roky. Zde je dominantní namáhání jednonuzlovým torzním kmitáním na třetím harmonickém násobku otáčkové frekvence soustrojí. K eliminaci torzního kmitání, které indikuje únavové namáhání materiálu hřídele, je na soustrojí nainstalován tlumič torzního kmitání Geislinger. Správná funkce tlumiče se posuzuje podle velikosti proměnného smykového napětí při jednotlivých provozních režimech soustrojí a podle rezonanční frekvence soustavy tlumič-motor generátor. Vzorkování analogového výstupu se provádí vibračním analyzátozem A4400 – VA4 Pro. Na obr. 6a je zobrazena instalace měřicího systému a na obr. 6b jsou vidět frekvenční spektra smykového napětí.



Obr. 6: Instalace měřicího systému KMT na rotor diesel generátoru (a) a frekvenční spektra smykového napětí v pořadí 0, 25, 50, 75, 100, 110 % výkonu (b)

#### Literatura

- [1] IEEE Standard 50.13. *Standard for Cylindrical-Rotor 50 and 60 Hz, Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above, latest edition*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Three Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.
- [2] ISO2226-1:2009. *Mechanical vibration – Torsional vibration of rotating machinery – Part 1: Land-based steam and gas turbine generator sets in excess of 50 MW*.
- [3] VÁCLAVÍK, Jaroslav a CHVOJAN, Jan. Torsion vibrations monitoring of turbine shafts. In: Science Direct. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, no. 001-004, p. 1349-1354. ISSN 2452-3216.



**REJSTŘÍK AUTORŮ****A**

Aišman David, 17, 215  
Andrle Karel, 185  
Andršová Irena, 169

**B**

Bařák Miloš, 125  
Bartíková Tereza, 193  
Bělohoubek Marek, 11  
Beran David, 51  
Berka Jan, 193  
Blažek Jan, 95  
Brabec Petr, 161  
Bricín David, 45  
Brom Jaroslav, 199  
Bunda Zbyněk, 229

**C**

Cízner Josef, 145

**Č**

Čapek Jiří, 157  
Čížek Jan, 219  
Čmakal Josef, 169

**D**

Dukovský Daniel, 35  
Dvořák Jiří, 151, 205  
Dymáček Petr, 189

**Ď**

Ďurica Juraj, 133

**E**

Ertl Jakub, 35

**F**

Fink Dominik, 229  
Frank Netrvalová Marie, 215  
Fulín Zdeněk, 45

**G**

Gabriel Dušan, 189  
Gál Petr, 189  
Ganev Nikolaj, 157

**H**

Hadraba Hynek, 219  
Hajas Michal, 139  
Hojná Anna, 219  
Horáček Vít, 17  
Houdková Šárka, 215  
Hruška Jan, 145  
Húska Lukáš, 181

**CH**

Chmela Tomáš, 169  
Chocholoušek Michal, 199  
Chvostová Eva, 211

**J**

Jáňa Miroslav, 115, 121  
Jírková Hana, 215  
Joanidisová Michaela, 81  
Joch Lukáš, 35

**K**

Kadečka Petr, 69  
Kahoun Hejhalová Jitka, 77, 175

Kasárník Milan, 27

Kaška Miloš, 27  
Klatovská Petra, 77  
Kloc Luboš, 151  
Konopík Pavel, 211  
Kopřiva Radim, 77, 175, 223  
Kostolný Igor, 115, 121  
Kotouč Miroslav, 189  
Koula Václav, 205  
Kozáková Veronika, 77  
Král Petr, 151, 205  
Krejčí Jakub, 151, 157  
Krpec Miroslav, 161  
Kubín Zdeněk, 17  
Kuchařová Květa, 151  
Kuchťáková Klára, 5  
Kvapilová Marie, 151, 205  
Kytka Miloš, 175

**L**

Lazar Jan, 11  
Lexa Josef, 11

**M**

Mareček Oto, 27  
Mareš Pavel, 23  
Marušáková Daniela, 233  
Mrňa Libor, 51  
Musilová Radka, 237

**N**

Netušil Jiří, 23  
Novotný Jan, 51

**O**

Ohanková Marie, 169

**P**

Patera Jan, 199  
Pazderová Martina, 219  
Pejša Miroslav, 223  
Pěnkava Milan, 175  
Petzová Jana, 125, 133  
Pilsová Lucie, 169  
Pištora Vladislav, 73, 189  
Plánička Stanislav, 95  
Polach Pavel, 11  
Procházka Jan, 193  
Prošek Tomáš, 5  
Pulc Martin, 103

**R**

Rudomilova Darya, 5  
Ruchař Miloslav, 109

**S**

Sedlák Filip, 81  
Schmidt Filip, 21  
Schnablová Ivana, 77, 223  
Sklenička Václav, 151, 205  
Sladký Jan, 95  
Slněk Dávid, 139  
Slováček Marek, 121  
Smola Vojtěch, 223  
Soukupová Witolda, 175  
Strejcious Josef, 45

Svobodová Marie, 205

**Š**

Šafařík Vilém, 229

Šebestová Hana, 51

Šefl Václav, 5

Šifner Jan, 205

Šipla Jan, 17

Šípová Monika, 233

Špirit Zbyněk, 45

Štarman Stanislav, 57

**T**

Trojan Karel, 157

Trojan Tomáš, 23

**V**

Václavík Jaroslav, 237

Varner David, 87

Varner Miroslav, 87

Vávrovcová Zuzana, 161

Veselá Jana, 39, 199

Veselka Zbyněk, 161

Veselý Stanislav, 1

Vít Jan, 219

Vlček Petr, 161

Volák Josef, 229

Vrtílková Věra, 151, 157

**Ž**

Žďárek Jiří, 69

Kolektiv autorů

Sborník z 18. konference

**„Životnost komponent energetických zařízení“**

Srní, 17. – 19. října 2023

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Vydavatelství**

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach, Lukáš Stuna, Marie Frank Netrvalová a Martina Chalupská

Počet stran: 285

Vydání první

Náklad: 180 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Pavel Polach, Petr Zuna a Martin Kronďák

ISBN 978-80-261-1175-7

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2023