

**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
18. – 20. října 2022

Kolektiv autorů

Sborník z 17. konference

„Životnost komponent energetických zařízení“

Srní, 18. – 20. října 2022

ISBN 978-80-261-1109-2

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2022

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
Prof. Ing. František Hrdlička, CSc., FEng. – ČVUT v Praze, FS
Ing. Martin Krond'ák, 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. 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 18. 10. 2022 (ODPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Nové metody softwarové podpory pro zdokonalení provozu energetických zařízení & Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

Garant: doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng.

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

Garant: Ing. Martin Krondřák, Ph.D.

STŘEDA 19. 10. 2022 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Materiálové inženýrství & Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů

Garant: Ing. Kamil Prešl

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Servis v energetice & Materiálové inženýrství & Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů

Garant: doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D.

ČTVRTEK 20. 10. 2020 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Provoz (klasických tepelných) elektráren & Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

Garant: Ing. Radovan Štastný

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

Garant: Ing. Martin Krondřák, Ph.D.

PŘEDMLUVA PROFESORA PETRA ZUNY

Vážené kolegyně, vážení kolegové,

Po roce se opět setkáváme na konferenci v Srní. Nepoužívám slovo „tradičně“, protože v loňském roce se řada z Vás zúčastnila této konference on-line. Věřím, že letos se opět setkáme osobně, vyslechneme zajímavé a aktuální přednášky a předáme si nejnovější poznatky a zkušenosti. Osobní kontakt je důležitý, vytváří nové vazby. Přímá diskuse je nenahraditelná. Přeji Vám hezký pobyt na Šumavě, hodně nových poznatků a příjemnou, přátelskou atmosféru celého jednání.

Petr Zuna

PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ

Vážené dámy, vážení pánové,

od roku 2022 jsme opatrně očekávali uklidnění a stabilizaci po dvou letech pandemie COVID 19, která se výrazně podepsala na mnoha průmyslových sektorech a v samotném důsledku také na fungování celé naší společnosti. Skutečnost se ukázala být zcela opačnou. V návaznosti na Ruskou agresi na Ukrajině se velmi rychle obnažily nejslabší stránky evropského energetického mixu a energetické politiky postavené na zrychleném útlumu jaderné energetiky podporované dlouhodobě, a dovolím si říct nekompromisně, ze strany Německa. S následky této politiky se dnes potýkáme všichni.

Zřetelněji než dříve, se ukazuje výrazná výhoda energeticky soběstačné ekonomiky a velmi rychle se začíná rýsovat cena příliš rychlé změny energetického mixu na úkor spolehlivosti, bezpečnosti a v neposlední řadě ekonomické udržitelnosti. Tyto okolnosti vytvářejí výrazný tlak na změnu strategie dalšího využívání dostupných zdrojů elektrické energie a tepla. V centru této změny je nezbytně diskuze o životnosti a zajištění bezpečného provozu této klíčové infrastruktury.

Jsem přesvědčen, že také rostoucí zájem o aktivní účast na naší konferenci „Životnost komponent energetických zařízení“, je důkazem nejenom dlouhodobé kvality tohoto společného, ale současně rostoucí potřeby sdílet informace, zkušenosti a nejzajímavější technické poznatky v této oblasti energetiky. Význam této problematiky jenom podtrhuje rozhodnutí Ministra průmyslu a obchodu Ing. Josefa Síkely udělit naší konferenci záštitou Ministerstva průmyslu a obchodu ČR, pod kterou bude letošní ročník konference pořádán.

Po diskusi v rámci programového výboru konference, který byl dále rozšířen o kolegy Ing. Zdeňka Čančuru, Ph.D. a Ing. Tomáše Zajíce, MBA (kterým tímto za ochotu přispět k dalšímu programovému směřování konference velmi děkuji), bylo společně odsouhlaseno rozšířit záběr letošního ročníku konference o tři další témata. Tyto nové oblasti jsou uvedeny plenárními přednáškami renomovaných odborníků. V první řadě se jedná o problematiku vodních elektráren (Ing. Roman Mašika), dále zařízení pro energetické využití odpadů, ZEVO (Ing. Pavel Veselý) a v neposlední řadě vodíkové hospodářství v energetice (Ing. Aleš Doucek, Ph.D.).

Úvodní den konference je program přednášek zaměřen převážně na dvě z nových témat – zařízení pro energetické využití odpadů, ZEVO a vodíkové hospodářství v energetice – a na jedno téma „klasické“ – využití diagnostiky pro podporu provozu klasických tepelných elektráren či sekundárního okruhu elektráren jaderných. Střední program je věnován problematice poslednímu z nových témat, vodním elektrárnám, a dvěma tradičním, materiálovému inženýrství a problematice svarových spojů. Ve čtvrtém programu je nejvíce příspěvků zaměřeno na problematiku primárního okruhu jaderných elektráren a problematiku koroze, další příspěvky se týkají převážně degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů creepem.

Závěrem mi dovoluji jménem organizačního týmu a programového výboru konference poděkovat všem partnerům, kteří výrazně přispěli ke konání letošního ročníku. Vám, drahým hostům, přeji, aby i letošní konference v Srní byla pro Vás odborně i společensky přínosná a obohacující.

Těším se na viděnou.

Stanislav Martínek

PROGRAM KONFERENCE

Úterý, 18. října 2022	
Registrace účastníků v hotelu Srní u recepce, 10:00 – 18:00	
Oběd v hotelu Srní, 11:30 – 12:45	
Zahájení konference, 13:00	
	Zahájení konference: Stanislav Martínek (VZÚ Plzeň) Novinky z VaV: Petr Zuna (ČVUT v Praze a IA ČR) Organizační pokyny: Pavel Polach (VZÚ Plzeň)
1. odpolední blok přednášek – Pavel Polach, 13:30 – 15:30	
13:30 – 14:00	Plenární přednáška – P. Veselý , Provoz ZEVO Plzeň – provozní zkušenosti po 6 letech provozu
14:00 – 14:15	J. Janovec a kol., Degradací procesy membránových stěn při spalování biomasy
14:15 – 14:30	J. Cizner a J. Hruška, Korozní odolnost žárových nástřiků v prostředí biomasy
14:30 – 14:45	S. Štarman, Diagnostika stavu konstrukčních prvků energetických zařízení
14:45 – 15:00	M. Švantner a M. Honner, Potenciál využití termografie pro diagnostiku a údržbu v energetickém průmyslu
15:00 – 15:15	P. Živný, Vizualní kontroly VN točivých elektrických strojů
15:15 – 15:30	M. Popovič a kol., Digitální dvojče energobloku Domoradice
Coffee break, 15:30 – 16:15	
2. odpolední blok přednášek – Šárka Houdková (VZÚ Plzeň), 16:15 – 18:00	
16:15 – 16:45	Plenární přednáška – A. Doucek , Vodíkové technologie jako nástroj dekarbonizace ekonomiky ČR
16:45 – 17:00	O. Chocholatý a L. Jarolímová, Vodík a Cold Spray
17:00 – 17:15	P. Polach a kol., Vývoj mobilní plnicí vodíkové stanice
17:15 – 17:30	A. Rudolf, 3D tisk a Virtuální realita ve ŠKODA JS a.s.
17:30 – 17:45	M. Krpec a kol., Analýza vad poškozené lopatky NT dílu turbogenerátoru JE
17:45 – 18:00	M. Ruchař a M. Štípek, Stend inspekcí palivových souborů
Slavnostní večeře v hotelu Srní, 19:00	

Středa, 19. října 2022	
Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15	
1. dopolední blok přednášek – Kamil Prešl (ČEZ, a. s.), 8:30 – 10:45	
8:30 – 9:00	Plenární přednáška – R. Mašika , Generální oprava soustrojí TG2 Elektrárny Slapy a technologicko-obchodní komplikace, které kriticky ovlivňují udržitelnost údržby a oprav
9:00 – 9:30	Daněk, Šilar, Problematika oprav na předrozváděcích lopatách přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně v období běžných odstávek
9:30 – 9:45	D. Braha, Slitina Cavitec – její vlastnosti a použití na vodních elektrárnách
9:45 – 10:00	J. Strejcius a kol., Korozně-únavové charakteristiky svarových spojů oceli COR 13/4
10:00 – 10:15	V. Novotný, Modifikace heterogenního svarového spoje potrubí napájecí vody v PG VVER 440 - JE EBO3,4
10:15 – 10:30	P. Gál a V. Pištora, Únavové hodnocení kritického místa TNR – přivaření košilky nátrubku HRK – pomocí elasto-plastického přístupu
10:30 – 10:45	J. Veselá a P. Mareš, Vysokoteplotní ultrazvukové zkoušení homogenních svarových spojů
Coffee break, 10:45 – 11:30	
2. dopolední blok přednášek – Petr Zuna (ČVUT v Praze a IA ČR), 11:30 – 12:30	
11:30 – 11:45	E. Chvostová a kol., Komplexní posouzení zbytkové životnosti turbínového tělesa na základě aktuálních materiálových dat získaných metodou malých vzorků
11:45 – 12:00	P. Polcar a kol., Vývoj náhradního materiálového atestu pro kovové konstrukční materiály JE s využitím umělé inteligence
12:00 – 12:15	K. Jiříkovský, Analýza textury materiálů s využitím konfokální laserové mikroskopie
12:15 – 12:30	M. Šípová a D. Marušáková, Perspektiva malého modulárního reaktoru chlazeného superkritickou vodou
Oběd v hotelu Srní, 12:45 – 13:45	

Čtvrtek, 20. října 2022

Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15

1. dopolední blok přednášek – Radovan Šťastný (nezávislý expert), 8:30 – 10:15

8:30 – 8:45	T. Vlasák a kol., Ověření odhadu dlouhodobých creepových vlastností 9-12%Cr ocelí v kratším časovém intervalu
8:45 – 9:00	M. Ohanková a kol., Porovnání austenitických přehřívákových ocelí po šestileté expozici v prostředí spalín
9:00 – 9:15	P. Zahrádka a Z. Fulín, Kontroly závitových hnízd nátrubků HRK JE Dukovany
9:15 – 9:30	J. Čapek a kol., Difrakční analýza korodovaných vzorků potrubí sekundárního okruhu JE před a po aplikaci nástřiku metodou Cold Spray
9:30 – 9:45	M. Pazderová a kol., Korozní odolnost Eurofer-97 v prostředí tekutých kovů
9:45 – 10:00	D. Slněk a M. Hajas, Monitorovanie korózných procesov v primárnom okruhu jadrových elektrárníach typu VVER-440 s využitím korózných slučiek
10:00 – 10:15	M. Hajas a D. Slněk, Hodnotenie hmotnostných úbytkov v rámci korózneho programu monitorovania nádrží pre skladovanie kvapalných rádioaktívnych odpadov

Coffee break, 10:15 – 10:45

2. dopolední blok přednášek – Martin Kronďák (ÚJV Řež, a. s.), 10:45 – 12:00

10:45 – 11:00	Sedlák, Hodnocení degradace betonů v JE vlivem H ₃ BO ₃
11:00 – 11:15	J. Berka a kol., Výzkumné aktivity v oblasti chemie chladiva pro systémy s oxidem uhličitým s nadkritickými parametry (sCO ₂)
11:15 – 11:30	M. Pulc: Integrovaný odvod vodíku ze systému kompenzace objemu v tělese HPV
11:30 – 11:45	L. Smolík a kol., Poskoky a třepotání segmentů – nežádoucí jevy při provozu kluzných ložisek s naklápěcími segmenty
11:45 – 12:00	J. Brom a kol., VaV projekty CVŘ pro oblasti povrchových úprav a nedestruktivních metod v roce 2022

Oficiální ukončení konference, 12:00 – 12:15

Oběd v hotelu Srní, 12:30 – 13:30

OBSAH

ODBORNÍ GARANTI	III
PROGRAMOVÝ VÝBOR	III
ORGANIZAČNÍ VÝBOR	III
GENERÁLNÍ PARTNEŘI	IV
HLAVNÍ PARTNEŘI	IV
MEDIÁLNÍ PARTNEŘI	V
ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDÁJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK	VI
PŘEDMLUVA PROFESORA PETRA ZUNY	VII
PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ	VIII
PROGRAM KONFERENCE	IX
OBSAH	XII
ZEVO PLZEŇ – PROVOZNÍ ZKUŠENOSTI PO ŠESTI LETECH PROVOZU	1
ZEVO PLZEN – OPERATIONAL EXPERIENCE AFTER SIX YEARS OF OPERATION	
PAVEL VESELÝ	
DEGRADAČNÍ PROCESY MEMBRÁNOVÝCH STĚN PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY	3
DEGRADATION PROCESSES OF MEMBRANE WALLS DURING BIOMASS BURNING	
JIŘÍ JANOVEC, LUCIE PILSOVÁ, JOSEF CIZNER A ZDENĚK FUNDA	
KOROZNÍ ODOLNOST VYBRANÝCH NÁSTŘIKŮ V PROSTŘEDÍ BIOMASY	7
CORROSION RESISTANCE OF SELECTED COATINGS IN BIOMASS FLUE GAS	
JOSEF CIZNER A JAN HRUŠKA	
POTENCIÁL VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PRO DIAGNOSTIKU A ÚDRŽBU V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU	13
POTENTIAL OF THERMOGRAPHY FOR DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE IN POWER INDUSTRY	
MICHAL ŠVANTNER A MILAN HONNER	
VIZUÁLNÍ KONTROLY VN TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	17
VISUAL INSPECTIONS OF HV ROTATING ELECTRICAL MACHINES	
PETR ŽIVNÝ	
DIGITÁLNÍ DVOJČE ENERGOBLOKU DOMORADICE	23
DIGITAL TWIN OF POWER BLOCK DOMORADICE	
MILOSLAV POPOVIČ, JAKUB ORAVEC A MARTIN SÁŇKA	
VODÍKOVÉ TECHNOLOGIE JAKO NÁSTROJ DEKARBONIZACE EKONOMIKY ČR.....	27
HYDROGEN TECHNOLOGY AS A TOOL FOR DECARBONIZATION OF THE ECONOMY OF THE CZECH REPUBLIC	
ALEŠ DOUCEK	
VODÍK A COLD SPRAY.....	29
HYDROGEN AND COLD SPRAY	
ONDŘEJ CHOCHOLATÝ A LUCIE JAROLÍMOVÁ	
VÝVOJ MOBILNÍ PLNICÍ VODÍKOVÉ STANICE	33
THE DEVELOPMENT OF A MOBILE HYDROGEN FILLING STATION	

3D TISK A VR VE ŠKODA JS A.S.	39
3D PRINTING AND VR IN ŠKODA JS A.S	
ANTONÍN RUDOLF	
ANALÝZA VAD POŠKOZENÉ LOPATKY NT DÍLU TURBOGENERÁTORU JE	41
DEFECT ANALYSIS OF THE NPP TURBOGENERATOR BLADE	
MIROSLAV KRPEC, JAROSLAV BURDA, MIROSLAVA ERNESTOVÁ, ZUZANA VÁVROVCOVÁ A PETR BRABEC	
STEND INSPEKCIÍ PALIVOVÝCH SOUBORŮ	47
FUEL ASSEMBLY INSPECTION STAND	
MILOSLAV RUCHAŘ A MARKO ŠTÍPEK	
GENERÁLNÍ OPRAVA SOUSTROJÍ TG2 ELEKTRÁRNY SLAPY A TECHNOLOGICKO – OBCHODNÍ KOMPLIKACE, KTERÉ KRITICKY OVLIVŇUJÍ UDRŽITELNOST ÚDRŽBY A OPRAV VODNÍCH ELEKTRÁREN	53
OVERHAULLING OF TG2 POWER PLANT SLAPY AND TECHNOLOGICAL – BUSINESS COMPLICATIONS THAT CRITICALLY AFFECT THE SUSTAINABILITY OF HYDROPOWER PLANT MAINTENANCE AND REPAIRS	
ROMAN MAŠIKA	
SLITINA CAVITEC – JEJÍ VLASTNOSTI A POUŽITÍ NA VODNÍCH ELEKTRÁRNÁCH	55
CAVITEC ALLOY – ITS PROPERTIES AND APPLICATIONS IN HYDRO POWER PLANTS	
DAVID BRAHA	
KOROZNĚ ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY SVAROVÝCH SPOJŮ OCELI COR 13/4	57
CORROSION-FATIGUE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF COR 13/4 STEEL	
JOSEF STREJCIUS, ZBYNĚK ŠPIRIT, DAVID BRICÍN A ZDENĚK FULÍN	
MODIFIKACE HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE POTRUBÍ NAPÁJECÍ VODY V PG VVER 440 - JE EBO3,4...	63
MODIFICATION OF HETEROGENEOUS WELDING CONNECTION OF FEED WATER PIPE IN STEAM GENERATOR VVER 440 - NPP EBO3,4	
VÁCLAV NOVOTNÝ	
ÚNAVOVÉ HODNOCENÍ KRITICKÉHO MÍSTA TNR – PŘIVAŘENÍ KOŠILKY NÁTRUBKU HRK – POMOCÍ ELASTO-PLASTICKÉHO PŘÍSTUPU	67
FATIGUE ASSESSMENT OF CRITICAL POINT ON THE RPV, WELDING OF THE HRK SLEEVE USING THE ELASTO-PLASTIC APPROACH	
PETR GÁL A VLADISLAV PIŠTORA	
VYSOKOTEPLTNÍ ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ HOMOGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ	73
HIGH TEMPERATURE ULTRASONIC TESTING OF HOMOGENOUS WELDED JOINTS	
JANA VESELÁ A PAVEL MAREŠ	
KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI TURBÍNOVÉHO TĚLESA NA ZÁKLADĚ AKTUÁLNÍCH MATERIÁLOVÝCH DAT ZÍSKANÝCH METODOU MALÝCH VZORKŮ	79
COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE OF THE TURBINE BODY BASED ON CURRENT MATERIAL DATA OBTAINED USING SUB-SIZED SPECIMENS	
EVA CHVOSTOVÁ, JAROSLAV KOC, PAVEL KONOPÍK A JINDŘICH VOKÁČ	
VÝVOJ NÁHRADNÍHO MATERIÁLOVÉHO ATESTU PRO KOVOVÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY JE S VYUŽITÍM UMĚLÉ INTELIGENCE	83

THE DEVELOPMENT OF A SUBSTITUTE MATERIAL CERTIFICATE FOR METAL STRUCTURAL MATERIALS WITH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

PETR POLCAR, LADISLAV KANDER, KAREL LIŠKA A MAREK BĚLOHOUBEK

ANALÝZA TEXTURY MATERIÁLŮ S VYUŽITÍM KONFOKÁLNÍ LASEROVÉ MIKROSKOPIE 87

TEXTURE ANALYSIS OF MATERIALS USING CONFOCAL LASER MICROSCOPY

KAREL JIŘIKOVSKÝ

PERSPEKTIVA MALÉHO MODULÁRNÍHO REAKTORU CHLAZENÉHO SUPERKRITICKOU VODOU 89

PERSPECTIVE OF A SMALL MODULAR REACTOR COOLED BY SUPERCRITICAL WATER

MONIKA ŠÍPOVÁ A DANIELA MARUŠÁKOVÁ

OVĚŘENÍ ODHADU DLOUHODOBÝCH CREEPOVÝCH VLASTNOSTÍ 9-12 %CR OCELÍ V KRATŠÍM ČASOVÉM INTERVALU 93

VERIFICATION OF ESTIMATION OF LONG-TERM CREEP PROPERTIES OF 9-12%CR STEEL IN A SHORTER TIME INTERVAL

TOMÁŠ VLASÁK, ŠÁRKA NEUMANNOVÁ A JAN ČECH

POROVNÁNÍ AUSTENITICKÝCH PŘEHŘÍVÁKOVÝCH OCELÍ PO ŠESTILETÉ EXPOZICI V PROSTŘEDÍ SPALIN 97

COMPARISON OF AUSTENITIC SUPERHEATER STEELS AFTER 6 YEARS EXPOSURE IN FLUE GAS ATMOSPHERE

MARIE OHANKOVÁ, IRENA ANDRŠOVÁ, PETR KRÁL, LUCIE PILSOVÁ, VÁCLAV BOUČEK, LADISLAV HORVÁTH, TOMÁŠ CHMELA A JOSEF ČMAKAL

KONTROLY ZÁVITOVÝCH HNÍZD NÁTRUBKŮ HRK JE DUKOVANY 101

INSPECTIONS OF THE THREADED NESTS OF HRK NPP DUKOVANY NOZZLES

PAVEL ZAHRÁDKA A ZDENĚK FULÍN

DIFRAKČNÍ ANALÝZA KORODOVANÝCH VZORKŮ POTRUBÍ SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU JE PŘED A PO APLIKACI NÁSTŘIKU METODOU COLD SPRAY 105

DIFFRACTION ANALYSIS OF CORRODED SAMPLES OF NPP SECONDARY CIRCUIT PIPES BEFORE AND AFTER COLD SPRAY COATING APPLICATION

JIŘÍ ČAPEK, KAREL TROJAN, NIKOLAJ GANEV A JIŘÍ ŽDÁREK

KOROZNÍ ODOLNOST EUROFER-97 V PROSTŘEDÍ TEKUTÝCH KOVŮ 109

CORROSION RESISTANCE OF EUROFER-97 IN HEAVY LIQUID METALS ENVIRONMENT

MARTINA PAZDEROVÁ, LUKÁŠ KOŠEK, ANNA HOJNÁ A HYNEK HADRABA

MONITOROVANIE KORÓZNYCH PROCESOV V PRIMÁRNOM OKRUHU JADROVÝCH ELEKTRÁRŇACH TYPU VVER-440 S VYUŽITÍM KORÓZNYCH SLUČIEK..... 115

MONITORING OF CORROSION PROCESSES IN THE PRIMARY CIRCUIT OF NUCLEAR POWER PLANT VVER-440 TYPE USING CORROSION LOOPS

DÁVID SLNEK A MICHAL HAJAS

HODNOTENIE HMOVNOSTNÝCH ÚBYTKOV V RÁMCI KORÓZNEHO PROGRAMU MONITOROVANIA NÁDRŽÍ PRE SKLADOVANIE KVAPALNÝCH RÁDIOAKTÍVNYCH ODPADOV 121

EVALUATION OF MASS LOSSES COUPONS IN A CORROSION MONITORING PROGRAM FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE STORAGE TANKS

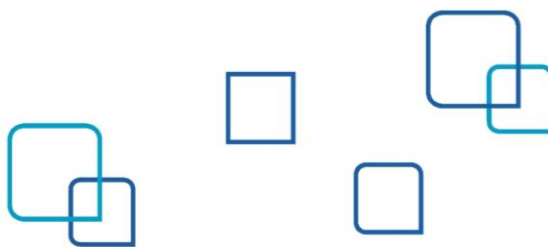
MICHAL HAJAS A DÁVID SLNEK

HODNOCENÍ DEGRADACE BETONŮ V JE VLIVEM H₃BO₃..... 127

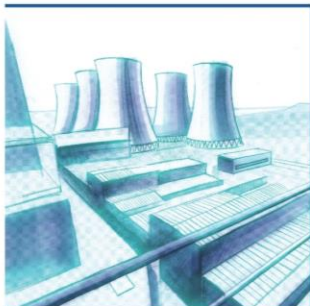
THE EVALUATION OF CEMENT CONCRETE DEGRADATION IN NUCLEAR POWER PLANT DUE TO H₃BO₃

FILIP SEDLÁK A MICHAELA JOANIDISOVÁ

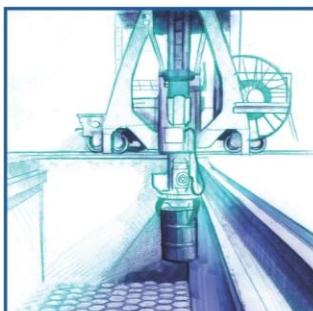
VÝZKUMNÉ AKTIVITY V OBLASTI CHEMIE CHLADIVA PRO SYSTÉMY S OXIDEM UHLÍČITÝM S NADKRITICKÝMI PARAMETRY (SCO₂)	131
SCO₂ COOLANT CHEMISTRY RESEARCH ACTIVITIES	
JAN BERKA, OTAKAR FRÝBORT, ALICE VAGENKNECHTOVÁ, TOMÁŠ HLINČÍK, ELIŠKA PURKAROVÁ A JAKUB-VOJTĚCH BALLEK	
INTEGROVANÝ ODVOD VODÍKU ZE SYSTÉMU KOMPENZACE OBJEMU V TĚLESE HPV	135
INTEGRATED HYDROGEN DRAINAGE FROM THE VOLUME COMPENSATION SYSTEM IN THE HPV BODY	
MARTIN PULC	
POSKOKY A TŘEPOTÁNÍ SEGMENTŮ – NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI PROVOZU KLUZNÝCH LOŽISEK S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY	141
SPRAGGING AND PAD FLUTTERING – ABNORMAL CONDITIONS DURING THE OPERATION OF TILT-PAD JOURNAL BEARINGS	
LUBOŠ SMOLÍK, JAN RENDL, ŠTĚPÁN DYK, RADEK BULÍN, ZDENĚK KUBÍN A MARTIN ŠIFALDA	
VAV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV A NEDESTRUKTIVNÍCH METOD V ROCE 2022	147
R&D PROJECTS IN CVR FOR SURFACE TREATMENTS AND NON – DESTRUCTIVE METHODS IN 2022	
JAROSLAV BROM, JANA VESELÁ, MICHAL CHOCHOLOUŠEK A JAN PATERA	
MOŽNOSTI REVERZNÉHO INŽINIERINGU A ADITÍVNEJ VÝROBY PRI NÁROČNÝCH A ČASOVO LIMITOVANÝCH OPRAVÁCH V PRIEMYSLE.	153
POSSIBILITIES OF REVERSE ENGINEERING AND ADDITIVE MANUFACTURING IN DEMANDING AND TIME-LIMITED REPAIRS IN INDUSTRY	
PETER BRZIAK, MIROSLAV JÁŇA, VOJTECH VÁCLAV, RASTISLAV DANKOVIČ A JIŘÍ SVOBODA	
REJSTŘÍK AUTORŮ	161



**Bezpečný
a efektivní
provoz
energetických
zařízení**



**Projektování
a související
inženýrské
služby**



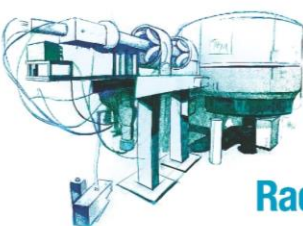
**Nakládání
s radioaktivními
i dalšími
odpady**



**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



ČEZ ESCO

ENERGY
SERVICE
COMPANY



společně, jako jeden tým, dodáváme

Teplo *z Komořan*

www.ue.cz

www.setep.cz



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





Centrum výzkumu Řež

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

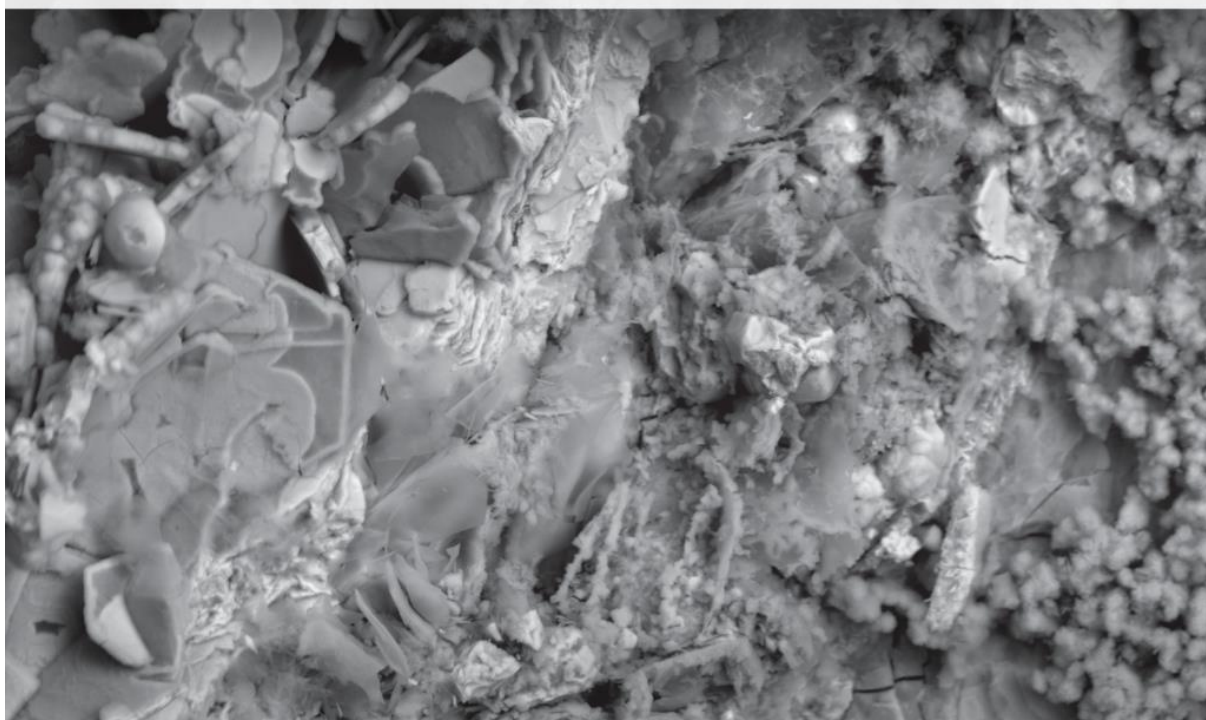
Výzkumná organizace zaměřená na výzkum, vývoj a inovace
v oboru energetiky, zejména jaderné.

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“.



www.cvrez.cz

cvrez@cvrez.cz

+420 266 173 181

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

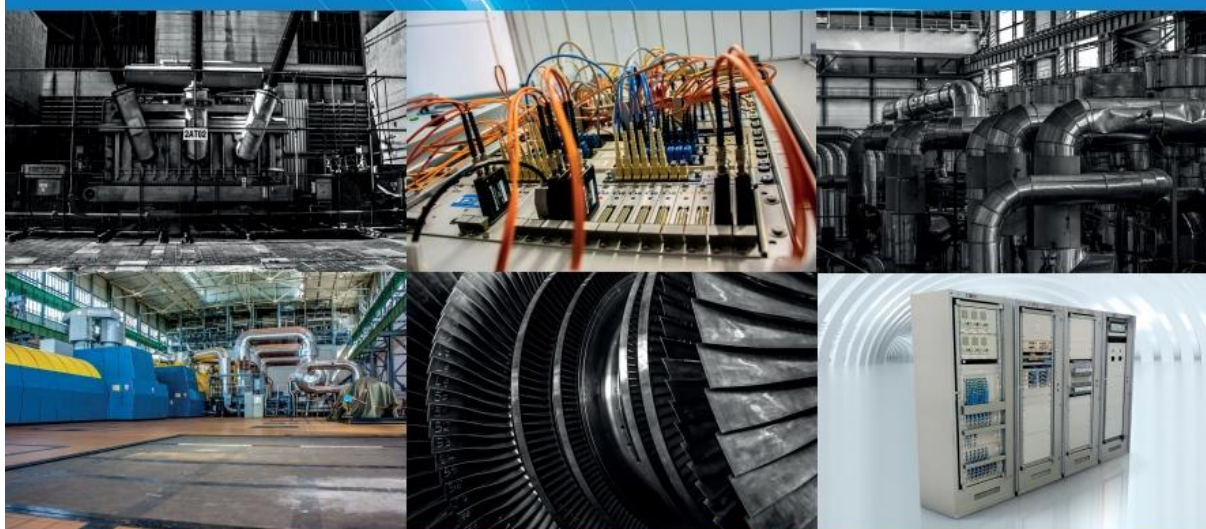




www.tes.eu

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

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

The logo for Union Ocel, featuring a stylized 'U' icon followed by the company name in a bold, sans-serif font.

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 Kopřivnici**



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 setkání, 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



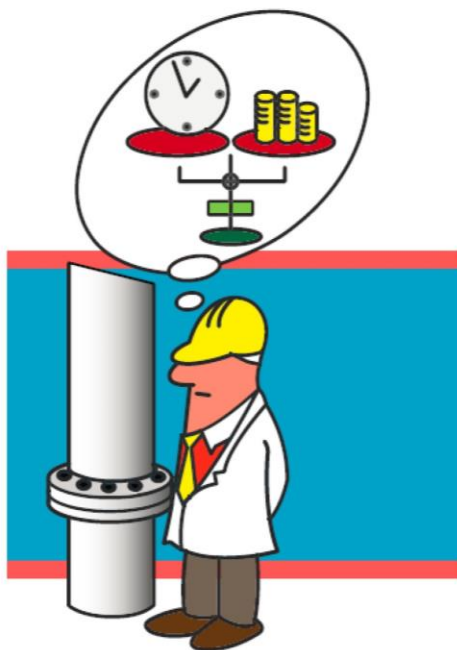
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

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 zařízení 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 nebo 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.

a

Kontaktní osoby:

Ing. J. Tomáš

Technický úsek

*Ústav procesní a zpracovatelské
techniky, fakulta strojní*

ČVUT Praha

Technická 4

166 07 PRAHA 6

TECHSEAL s.r.o.

Černokostelecká 128/161

102 00 PRAHA 10

technici@techseal.cz

tel.: +420 602 337 058

tel.: +420 604 443 284

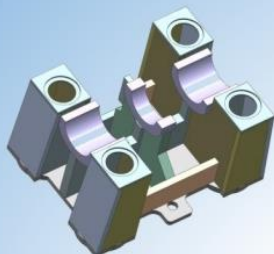


FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

REGIONÁLNÍ
TECHNOLOGICKÝ
INSTITUT

REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT

VÁŠ PARTNER PRO VĚDU, VÝZKUM A SPOLUPRÁCI



Digitální inženýring

Aditivní výroba

Materiálové inženýrství

Silniční vozidla

Kolejová vozidla

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

www.rti.zcu.cz





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, sbližovat 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. Aktivita odborných sekcí IA ČR pokrývajících 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

web: www.eacr.cz

ZEVO PLZEŇ – PROVOZNÍ ZKUŠENOSTI PO ŠESTI LETECH PROVOZU

ZEVO PLZEN – OPERATIONAL EXPERIENCE AFTER SIX YEARS OF OPERATION

Pavel Veselý

ZEVO Plzeň

Abstrakt

Provozní zkušenosti získané za 6 let provozu ZEVO Plzeň. Jaký je vliv spalování odpadu na životnost zařízení – kotle. Zaměřením na snížení životnosti kotle vlivem teplotního opotřebení a hlavně koroze (převážně chlórové).

Abstract

Operational experience gained during six years of operation of ZEVO Plzeň. What is the effect of waste incineration on the life of the device – the boiler. By focusing on the reduction of boiler life due to temperature wear and mainly corrosion (mainly chlorine).

DEGRADAČNÍ PROCESY MEMBRÁNOVÝCH STĚN PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY

DEGRADATION PROCESSES OF MEMBRANE WALLS DURING BIOMASS BURNING

Jiří Janovec ^{a)}, Lucie Pilsová ^{a)}, Josef Cizner ^{b)} a Zdeněk Funda ^{c)}

^{a)} Ústav materiálového inženýrství, Strojní fakulta ČVUT v Praze

^{b)} SVÚM a.s., Výzkumný ústav Čelákovice

^{c)} BFS Industry, s.r.o., Praha 5

Abstrakt

Životnost spodních částí membránových stěn je ovlivněna provozními parametry a konstrukčním provedením kotlů ale především použitým palivem. Při spalování lesní štěpky, slámy, kukuřice a tuhých alternativních paliv, vznikajících při recyklaci většinou plastových obalů, dochází ke zcela rozdílným chemickým poměrům a tím k interakci různě agresivních korodentů s povrchem membránových stěn.

Při běžném použití nelegovaných či nízkolegovaných ocelí může v důsledku kombinace korozního napadení a abrazivního opotřebení docházet k úbytkům stěn v řádu mm/rok.

V příspěvku jsou dokumentovány mikrostrukturální a mikrochemické analýzy popsaného poškození, stanoveny hlavní příčiny a diskutovány možné způsoby ochrany.

Abstract

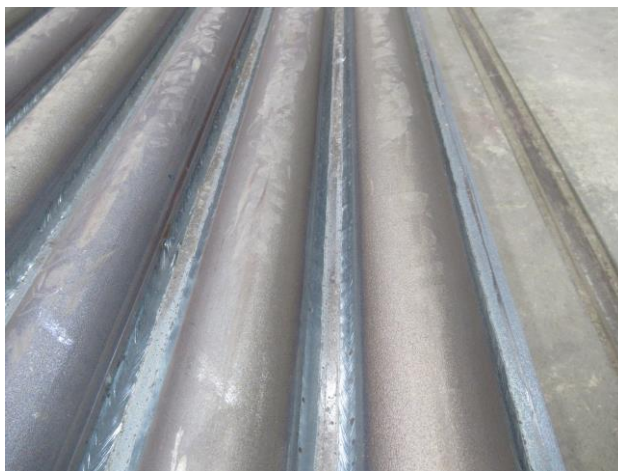
The service life of the lower parts of the membrane walls is influenced by the operating parameters and design of the boilers, but above all, by the fuel used. During the combustion of wood chips, straw, corn, and solid alternative fuels, created during the recycling of mostly plastic packaging, completely different chemical conditions occur, and thus the interaction of variously aggressive corrodents with the surface of the membrane walls.

With the regular use of unalloyed or low-alloyed steels, wall losses in the order of mm/year can occur due to a combination of corrosion attack and abrasive wear. In the paper, microstructural and microchemical analyzes of the described damage are documented, the main causes are determined, and possible methods of protection are discussed.

Úvod

Membránové stěny jsou nedílnou součástí energetických kotlů. Průměr trubek standardně bývá 60,3 mm, 57 a 51 mm, případně i jiné dle požadavku. Obvyklý počet trubek v membránovém panelu bývá 2 až 11, tloušťka stěny trubek min. 3 mm. Trubky se vyrábějí běžně z ocelí P235 GH, P265GH a 16Mo3, případně dle požadavku (Obr. 1).

Membránové stěny se vyrábí dle ČSN EN 12952. Obvykle je pro výrobu membránových stěn použita svařovací metoda 121 svařování pod tavidlem vícehořákovým automatem. Montážní svary bývají provedeny ručně či 135/MAG, také se používá hybridní laserové svařování.

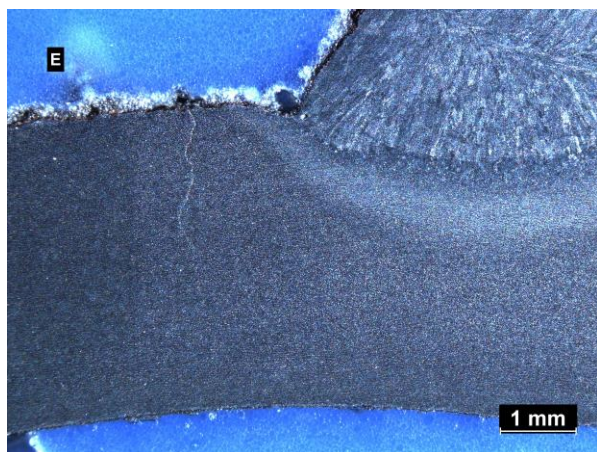


Obr.1: Membránová stěna

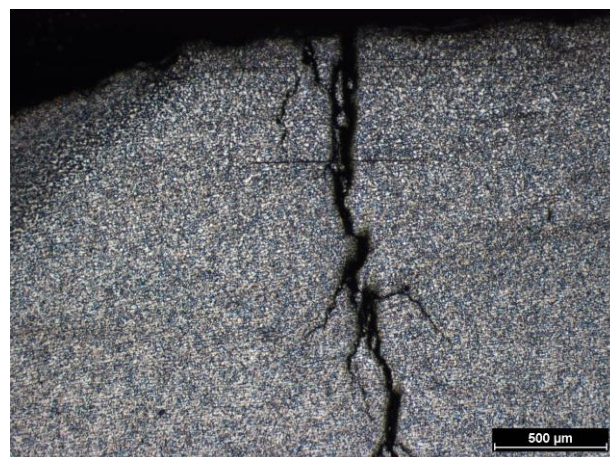
Degradační procesy membránových stěn

Životnost membránových stěn je ovlivněna provozními parametry a konstrukčním provedením kotlů, ale především použitým palivem, a to u všech typů průmyslových kotlů, tj. horkovodních, teplovodních i parních.

Jako u každé svařované konstrukce je citlivou oblastí provedení svarových spojů, zde koutových svarů mezi trubkou a praporkem. U současných kotlů původní problémy snížené kvality svarů byly odstraněny používáním automatizovaných multihořákových systémů. Přesto, se můžeme po krátkém provozu setkat s netěsností stěny, iniciovanou trhlinou z tepelně ovlivněné zóny TOZ svaru, viz Obr. 2 a) a b).



Obr. 2 a) makrostruktura trhliny

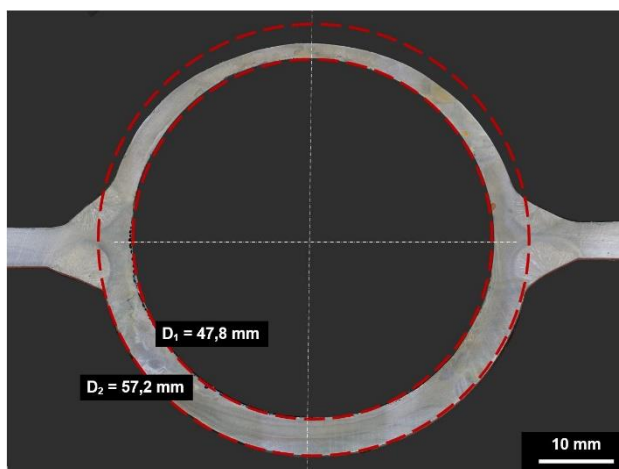


b) mikrostruktura trhliny

Mikrostrukturální rozbor ukázal, že trhliny mají vždy stejný charakter, jejich orientace, průběh a případné větvení od vnějšího povrchu jsou obdobné, interkrystalické. Iniciační oblast na povrchu je lineární do hloubky 100 až 200 µm. V místě povrchového rozevření jsou trhliny vyplněny oxidickým znečištěním. Také povrchové oblasti trubky vykazují znaky korozního napadení, zřejmě povrchovými hydratovanými oxidy či hydroxidy. Směr postupu trhliny stěnou trubky určuje provozní napjatost v membránové stěně, jde o typický průběh trhliny vyvolaný korozi pod napětím. Následný interkrystalický průběh, větvení a vybočování trhliny svědčí o vyšší plastizační schopnosti oblastí trubky a praporku, vzdálenějších od TOZ svarového kovu.

Koncentrace vodíku, stanovená na spalovacím analyzátoru Galileo G8, vykazovala u základního materiálu trubky, praporku nebo svarového kovu běžné hodnoty od 2,02 do 5,7 ppm. Na povrchu v místě vzniku trhlín byla naměřena extrémně vysoká a nepřijatelná koncentrace vodíku 91,7 ppm. Koncentrace vodíku na vnějších površích membránové stěny se pohybovala opět v jednotkách ppm. Zdroj koncentračního nárůstu vodíku, a tedy vodíkového zkřehnutí leží uvnitř ve spalovací komoře. Jde zřejmě o důsledek redukční atmosféry a provozní disociace metanu či sirovodíku ve spalovacím prostoru [1].

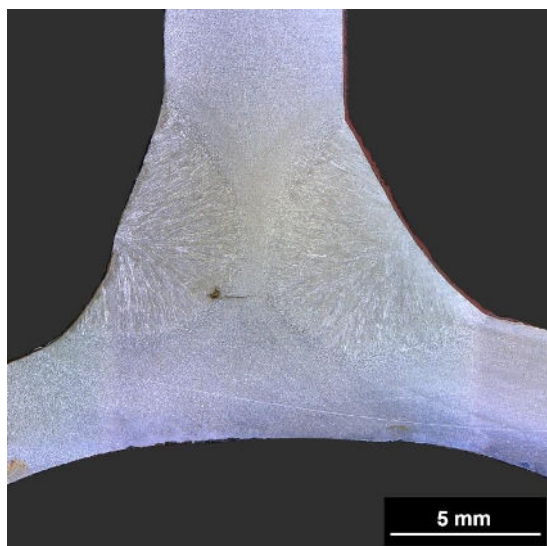
Zcela jiný mechanismus poškození membránové stěny ukazuje Obr. č. 3 při pálení štěpky v horkovodním kotli.



Obr. 3 Úbytek tloušťky stěny

Po cca 1,5ročním provozu došlo na u stěny 4,7 mm na straně palivové komory k poklesu až na minimální hodnotu 2,03 mm.

Svarové spoje (Obr. 4) provedené hybridním laserovým svařováním hodnocené dle ČSN EN ISO 5817 vykazaly nejvyšší stupeň kvality B. Kontrola chemického složení trubek, praporků i přídavného materiálu potvrdila, že hodnoty plně odpovídají chemickému složení dodaných taveb dle certifikátů 3.1.



a)



b)

Obr. 4 Provedení koutových svarů Obr. 5 Povrch trubek a) zeslabení b) vnější

Z mikrostrukturálních analýz vyplynulo, že ztenčování stěn trubek membránových stěn na povrchu styku se spaliny (Obr. 5 a) je důsledkem masivního odlupování korozních spodin vznikajících při provozu kotle. Z povrchů jsou odstraňovány povrchové nerovnosti, vznikající při výrobě plechů či trubek. K uvedené delaminaci povrchových vrstev trubek může docházet jak dilatačními změnami, tak erozivním opotřebováním abrazivních částic ve spalínách.

K popsanému koroznímu napadení trubek dochází jen v dolních částech membránových stěn, a to jak levé, tak pravé stěny. Korozní napadení vnitřních povrchů trubek je zanedbatelné a dokládá, že vodní hospodářství kotle nevykazuje žádné závady. Také vnější ochranný povrchový nátěr membránových stěn prokazuje plnou funkčnost (Obr. 5 b).

Smluvní podmínky mezi dodavatelem kotle a provozovatelem vymezily velikosti granulátu štěpky 8–63 mm a hustoty 280–350 kg/m a limity spalin v hm. procentech pro:

Obsah popele v sušině:	5	Camebax MICRO
C	51	21,65 – 26,04
S	0,02	2,11 – 2,74
N	0,1	-
H	6,3	-
Cl	0,01	2,44 – 3,27
Fl	0,0023	-
K	0,4	0,99 – 1,59
Al	-	19,27 – 20,24
Mg	-	5,02 – 6,51

K identifikaci agresivního korodentu byl použit mikrochemický elektronový analyzátor Camebax MICRO, chemické složení odebraných korozních zplodin viz v pravé části.

V případě zelené štěpky při pálení slámy či kukuřice se lze u uvedenými vysokými koncentracemi setkat, přitom při pálení kukuřice se navíc zvyšuje obsah popelovin obsahující abrazivní částice a životnost komponent spalovacích prostorů prudce klesá. Požadovaná 20letá

životnost klesá na jednotky roků. Také při dospalování peletek z recyklačních procesů, především termoplastických materiálů, jsou zjišťovány vysoké koncentrace korozně agresivních prvků Cl a S a prudký pokles životnosti komponent kotlů. Vysoká koncentrace Al (kolem 20 %) může souviset se spalováním TAP, obsahující Al folie. Hliník by pak měl být zjištěn ve spodní části kotle či na roštu.

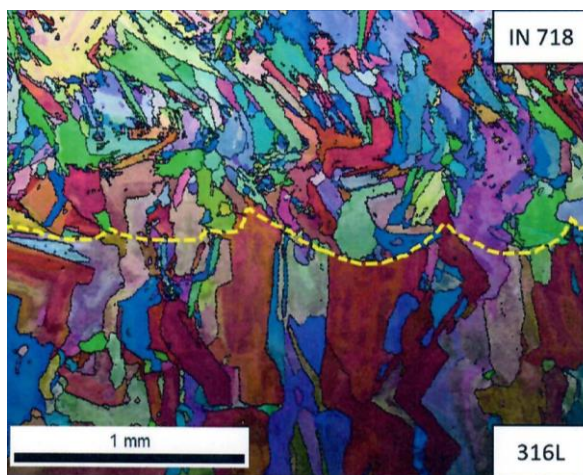
Způsob degradace používaných ocelí závisí na maximálních teplotách při provozech kotlů. U parních kotlů při dosahování teplot 315 až 480 °C dochází v důsledku oxidů síry k sulfataci materiálu trubek především eutektickými solemi sodíku a draslíku s teplotou tání 427 °C. V případě solí vanadu je teplota tání kolem 530 °C. Při vysoké koncentraci Cl při těchto vysokých teplotách nad rosným bodem dochází ke vzniku solí Cl s K, Na Al a Si zase s teplotami tání kolem 350 až 450 °C.

V případě teplovodních kotlů s max. teplotami spalin v oblasti 140 až 188 °C vznikají však v návaznosti na vrstvu paliva na roštích a jeho vlhkost a na výši rosného bodu podmínky ke vzniku kyselých kondenzátů Cl a S. Ty stékají do dolních spalovacích prostor kotlů a v kombinaci s erozivním opotřebením abrazivními částicemi dochází k masivnímu koroznímu úbytku ocelí. V redukčních atmosférách (viz vysoké obsahy C a S) může dojít i ke stékání dehtu a vzniku H₂S.

Účinným bariérovým prostředkem proti popsanému mechanismu korozního napadení v kombinaci s erozivně abrasivním opotřebením je řešení membránových stěn jako u spaloven komunálního odpadu. Jde o dvouvrstvé návary Inconelem 625, když druhou vrstvou se potlačuje negativní vliv difúzního Fe v první vrstvě. Ke zvýšení abrazivní odolnosti popílků se nově využívá plasmového pulzního navařování PTA (Plasma Transferred Arc) s 15 či 30 % přídavky SiC nebo B₄C, zpevňující inconelovou matici na 800 či 1000 HV [2].

V r. 2019 jsem zde prezentoval přednášku Vývoj a vlastnosti termálních metalických nástřiků (NiCr nebo NiCrMoWTi) k prodloužení životnosti komponent spaloven, tepláren a energetických celků.

Kvalitnější rozhraní koaxiálního přechodu mezi hrubozrnnou 316L a jemnozrnným inconelem IN 718, vytvořeného 3D tiskem, ukazuje Obr. 6. [3]



Obr. 6 EBSD analýza oblasti přechodu 316L a IN 718

Literatura

- [1] JANOVEC, Jiří. Strukturální a chemická analýza trhlin vzorků z membránové stěny. Praha, 2016, *Znalecký posudek 25-2/16*
- [2] STULHOFER, Jan. Navařování abrazivzdorných povlaků metodou pulzního PTA, FS ČVUT v Praze, 2022, *Diplomová práce*
- [3] UHLÍK, Matouš. Vliv deformační rychlosti na mechanické vlastnosti funkčně gradovaných materiálů vytvořených aditivními technologiemi. FS ČVUT v Praze, 2022, *Diplomová práce*

KOROZNÍ ODOLNOST VYBRANÝCH NÁSTŘÍKŮ V PROSTŘEDÍ BIOMASY

CORROSION RESISTANCE OF SELECTED COATINGS IN BIOMASS FLUE GAS

Josef Cizner a Jan Hruška

SVÚM a.s., www.svum.cz

Abstrakt

V tomto článku bylo v laboratorních podmínkách v modelové atmosféře simulující spaliny z biomasy obsahující chlor a další prvky a pod modelovou úsadou zkoušeno několik různých povlaků na bázi niklu. Kromě různých typů niklových nástřiků byly zvoleny i různé technologie nanášení – elektrický oblouk, plazma, HVOF. Základním materiálem byla žárupevná feritická ocel 16Mo3 a austenitická ocel AISI 310. Celková doba expozice v laboratorních podmínkách byla 2000 hodin. K porovnání korozní a strukturní stability testovaných nástřiků/povlaků při teplotě 550 °C bylo použito několik technik – gravimetrická analýza, světelná metalografie a WDS mikroanalýza. Některé z testovaných povlaků vykazovaly výrazně nižší korozní poškození než základní materiál a mohly by být dobrou možností pro úpravu uhelných kotlů na biomasové.

Abstract

In this paper, several different nickel-based coatings were tested under laboratory conditions in a model atmosphere simulating biomass flue gas containing chlorine and other elements and under a model deposit. In addition to different types of nickel coatings, different deposition technologies - electric arc, plasma, HVOF - were chosen. The base material was 16Mo3 ferritic steel and AISI 310 austenitic steel. The total exposure time in laboratory conditions was 2000 hours. Several techniques – gravimetric analysis, light metallography and WDS microanalysis – were used to compare the corrosion and structural stability of the tested injections/coatings at 550 °C. Some of the tested coatings showed significantly lower corrosion damage than the base material and could be a good option for retrofitting coal to biomass boilers.

Úvod

V rámci evropské politiky snižování obsahu CO₂ (klimatické změny) bylo stanoveno, že se sníží nejméně 20 % emisí skleníkových plynů (ve srovnání s rokem 1990), 20 % veškeré energie vyrobené v EU bude pocházet z obnovitelných zdrojů a že se zvýší energetická účinnost o 20 % [1]. Jednou z cest, jak snížit spotřebu fosilních paliv, je výroba elektřiny a energie z obnovitelných zdrojů – v případě Česka především z biomasy. Podle údajů Eurostatu bylo v roce 2018 téměř 60 % nefosilních paliv ve formě biopaliv [1]. Předpovědi naznačují, že biomasa bude dominantní součástí mixu obnovitelných zdrojů energie i v blízké budoucnosti. Zejména díky rychlému nárůstu těžby biomasy (především dřeva) v posledních letech ve srovnání s obdobím 2011-2015. Tento nárůst činí celkem asi 50 % a je způsoben rostoucím trhem se dřevem a v některých členských státech také výskytem kůrovce [2]. Proto se v kotlích spaluje stále více biomasy spolu s dalšími alternativními druhy paliv (vylepšené recyklované palivo, odpad atd.) a vzhledem k přítomnosti velmi reaktivních prvků u některých druhů biomasy – seno, sláma v tomto druhu paliva (chlór, síra) hrozí vyšší riziko korozního napadení než v případě uhlí.

Bylo provedeno několik studií o tom, jak spalování nebo spolu spalování biomasy může zvýšit korozní agresivitu spalin – zejména kvůli přítomnosti vysokého obsahu síry a chloru v lochy v zařízeních spalujících slámu a v takovém prostředí nelze použít běžné materiály

kotlových trubek [3]. V případě dřevní štěpky nejsou spaliny tak korozivní jako sláma nebo tráva/seno, ale přesto je míra koroze mnohem vyšší než v uhlerných elektrárnách, které používají feritické/perlitické oceli do 550 °C nebo austenitické oceli v nadkritických jednotkách. To může být problematické zejména pro elektrárny/teplárny s uhlernými kotli, které přecházejí na biomasu bez větších investic nebo vylepšení materiálů přehříváků. Obecně je v tomto případě lepší použít austenitické slitiny nebo slitiny na bázi niklu, ale investiční náklady jsou vysoké. Další reálnou možností je použití návarů nebo žárových nástřiků – ty mohou výrazně zlepšit korozní odolnost běžných materiálů v prostředí s obsahem chlóru [4].

Zkoušené nástřiky, technologie nanášení, podmínky zkoušek vysokoteplotní koroze

Zkoušené nástřiky, technologie

- Matrice pro nanášení – 16Mo3 a AISI 310
- HVOF – nástřik na pracovišti VZÚ, slitina CoCrAlY TaCSi
- TWAS – nástřik el. obloukem na pracovišti VZÚ, slitina NiCrTi
- Plazma – nástřik plazmou na ÚFP AV, slitina NiCrBSi, plazmový hořák WSP-H500
- Pseudo povlak – nástřik el. obloukem na pracovišti Messer Eutectic Castolin. Podkladová vrstva NiCrSi, pseudoslitina vzniká současným nanášením slitiny CrMoNbB a slitiny 625.
- TWAS – nástřik na pracovišti Messer Eutectic Castolin slitinou Alloy 625.

Tab. 1 Chemické složení zkoušených nástřiků

Materiál	Ni	Cr	Fe	Mo	Si	Co	Y	Nb
16Mo3	<0,3	<0,03	bal.	0,25-0,35	<0,35	–	–	–
AISI 310	19-22	24-26	bal.	–	<1,5	–	–	–
K50 – Plasma	bal.	9,5	3,5	–	4	–	–	–
TWAS 45CT	bal.	42-46	<0,5	–	<0,2	–	–	–
HVOF Amperit 469	–	23-27	–	–	0,6-0,9	bal.	0,6-0,9	–
TWAS Alloy 625	bal.	20-23	<5	8-10	<0,5	<0,5	–	3,15-4,15
TWAS Pseudo	bal.	22	–	12	–	–	–	4
Materiál	Mn	Al	Cu	Ti	C	Ta	N	B
16Mo3	0,40-0,90	–	<0,3	–	0,12-0,20	–	<0,012	–
AISI 310	<2	–	–	–	<0,1	–	<0,11	–
K50 – Plasma	–	–	0,3	–	<0,3	–	–	2,5
TWAS 45CT	<0,2	–	<0,5	0,3-1	0,01-0,1	–	–	–
HVOF Amperit 469	–	6,5-8,5	–	–	0,6-0,9	6,9-9,5	–	–
TWAS Alloy 625	<0,5	<0,4	–	<0,4	<0,1	–	–	–
TWAS Pseudo	–	–	–	–	–	–	–	3

Podmínky zkoušení

Pro zkoušení vysokoteplotní koroze pod modelovou úsadou byla zvolena teplota 550 °C a modelová atmosféra spalin rostlinné biomasy s modelovou úsadou. (tab.2). Zkoušky byly provedeny do 2000 hodin. Pro laboratorní zkoušky korozní odolnosti byly pro následnou expozici v korundových lodičkách zhotoveny vzorky:

- a) válečky průměru 8x25 mm, čela pokryta návarem slitiny Alloy 625
- b) zarovnání tloušťky čel na 1,5 mm a následné přibodování jednotlivých válečků do tyče s cca 10 válečky

c) následný nástřík na povrch tyče a posléze rozřezání na jednotlivé vzorky.

Tab. 2 Složení zkušební atmosféry a modelové úsady

Složka	HCl	SO ₂	CO ₂	CO	O ₂	N ₂
Obsah	200 ppm	30 ppm	12 vol%	50 ppm	3 vol%	Bal.

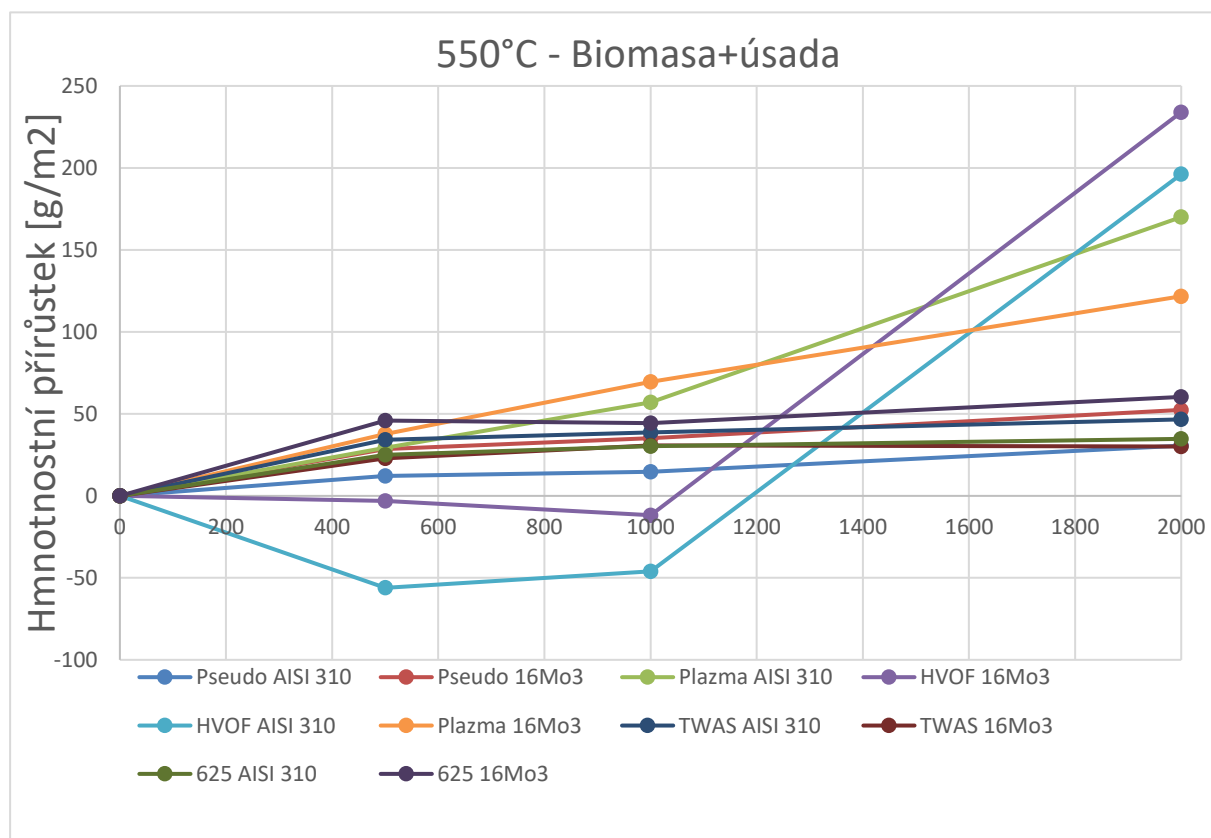
Složka	KCl	K ₂ SO ₄
Obsah	50 %	50 %

Výsledky hodnocení po tepelné expozici

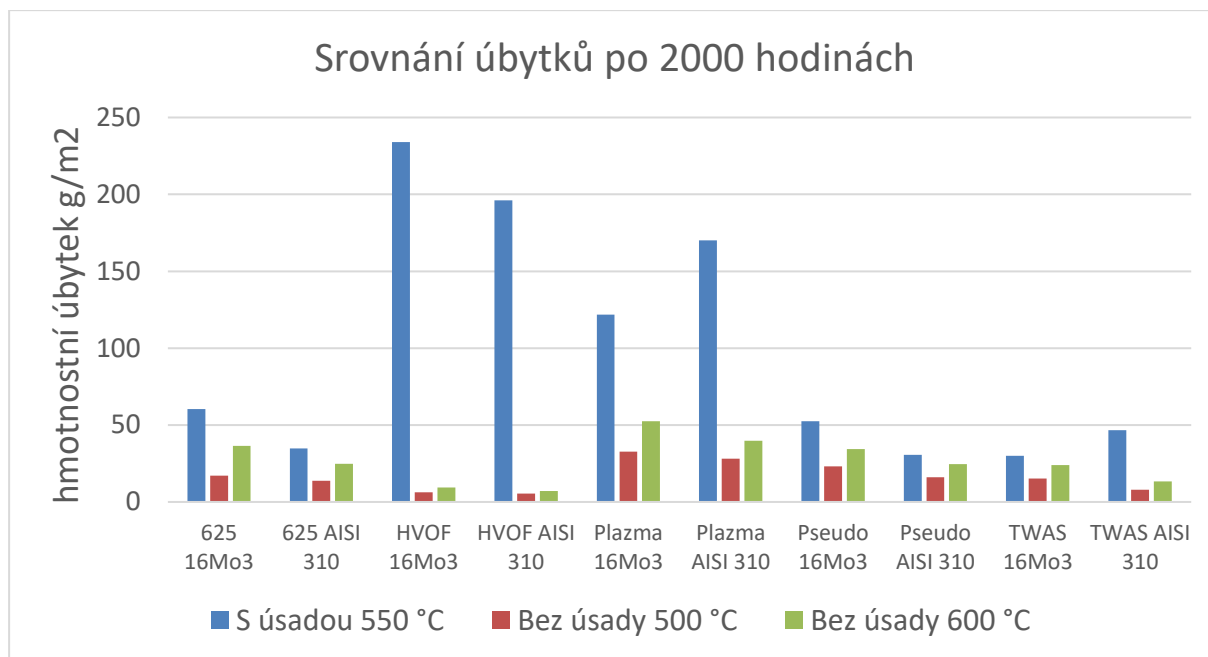
Gravimetrické hodnocení

Korozní vzorky byly po čase 500, 1000 a 2000 hodin vyjmuty z korundových lodiček a zváženy. Grafy pro jednotlivé nástříky, nanesené na substráty 16Mo3 a AISI 310 jsou vyneseny na obr. 1. Lze pozorovat, že po počátečním nárůstu přírůstků hmotnosti až do doby zkoušení 2000 hodin je další průběh rovnoměrný pro nástříky zhotovené el. obloukem.

Na obr.2 je sloupkový diagram, kde jsou porovnány úbytky hmotnosti pro nástříky zkoušené bez modelové úsady při teplotách 500 a 600 °C a nástříky s touto úsadou při teplotě 550 °C.



Obr. 1 Výsledky gravimetrie vzorků při teplotě 550 °C



Obr. 2 Porovnání zkoušek v modelové úsadě a bez

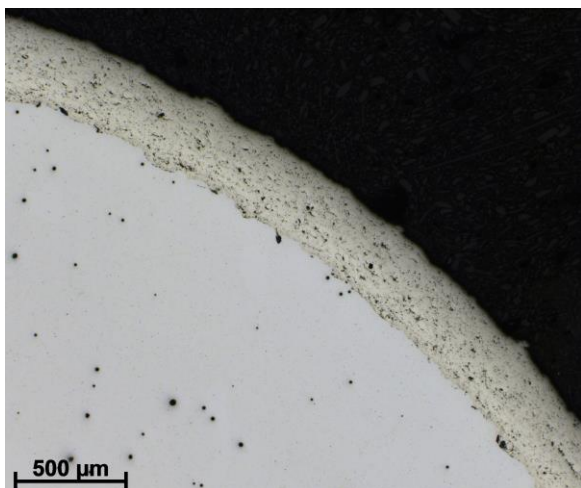
Metalografické hodnocení

Z exponovaných vzorků byly zhotoveny metalografické výbrusy a struktura jednotlivých nástríků byla zdokumentována na následných obrázcích.

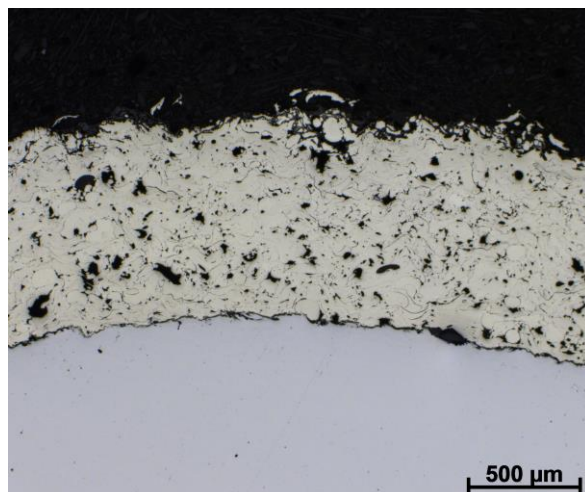
Nejkvalitněji se jeví nástrík pomocí metody HVOF (Obr.3). Nástrík je poměrně homogenní, obsahuje nízký objem pórů. Na obr. 4 je potom struktura nástríku při použití plazmy. Zbylé tři nástríky byly zhotoveny technologií nástríku elektrickým obloukem. Jejich struktura s řadou oxidických plen je na obr. 5 a 6 (uvedeno pouze pro slitinu 625 a slitinu 45CT). Tato technologie se jeví jako nejméně kvalitní, po oxidických plenách dochází při provozu k difuzi některých prvků – kyslík, síra, chlor.

Mikroanalýza

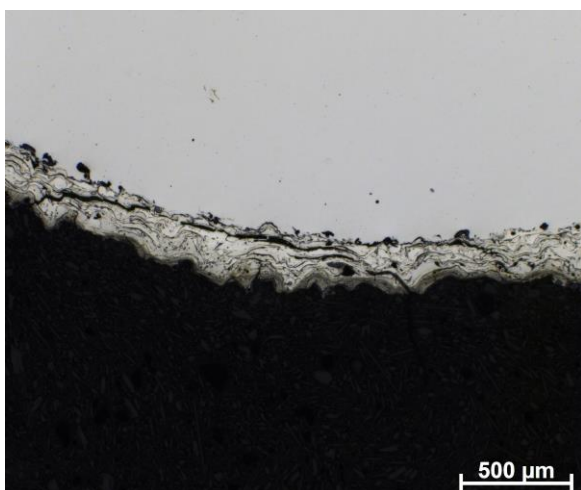
Na mikroanalyzátoru CAMEBAX s vlnově disperzními spektrometry byl provedeno měření nástríků formou koncentračního profilu od povrchu k základnímu materiálu. Tabulky jednotlivých prvků v koncentračním profilu a následné grafy jsou pro vybrané nástríky v tabulkách 3 a 4 (uveden nástrík slitinou 625 a slitina 45CT).



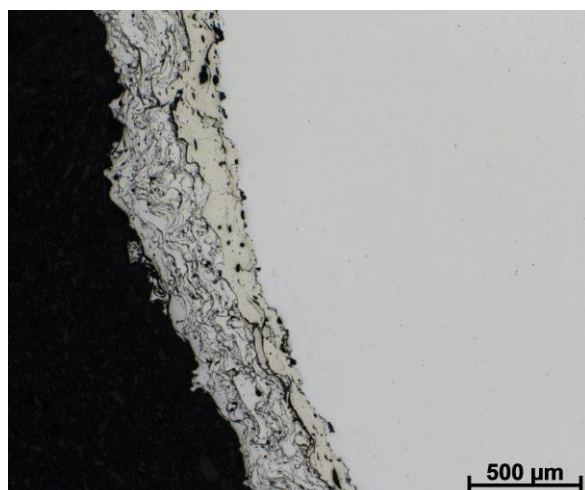
Obr. 3 Nástřík HVOF po expozici
2000 hodin při 550 °C



Obr. 4 Plazmový nástřík po expozici
2000 hodin při 550 °C



Obr. 5 Nástřík TWAS (45CT) po expozici
2000 hodin při 550 °C



Obr. 6 Nástřík TWAS (625) po expozici
2000 hodin při 550 °C

Tab. 3 Chemické složení povlaku ze slitiny 625 od povrchu do základního materiálu (krok 20 μm)

	W%(C)	W%(Al)	W%(Si)	W%(Ti)	W%(Cr)	W%(Mn)	W%(Fe)	W%(Co)	W%(Ni)	W%(Nb)
1	0.0850	0.2870	0.4410	0.3420	21.1880	0.4710	4.6580	5.3210	53.5580	4.0210
2	0.0730	0.3000	0.3680	0.3620	22.1000	0.5100	4.2500	4.8740	53.7410	3.7110
3	0.0920	0.3040	0.4050	0.3500	21.6500	0.4850	3.8510	4.6650	55.0030	3.8050
4	0.1100	0.2740	0.3660	0.4020	23.0870	0.4320	4.6300	5.0380	51.0480	3.9000
5	0.0650	0.2660	0.3520	0.3780	22.6300	0.3520	5.1000	4.2880	51.6340	3.7400
6	0.0700	0.4500	0.4400	0.3520	23.0450	0.4200	4.6880	4.7000	52.8650	3.6520
7	0.0700	0.4000	0.3740	0.3800	22.6540	0.4180	4.8210	4.6250	53.3100	3.8940
8	0.0588	0.3690	0.3880	0.4100	23.5400	0.4620	4.5000	4.5270	52.4730	3.5820
9	0.1320	0.0000	0.0401	0.0000	1.0200	0.0520	0.0770	0.0000	98.3300	0.1140
10	0.1500	0.0000	0.3330	0.0000	0.0220	0.6330	97.9100	0.0000	0.2580	0.1010

Tab. 4 Chemické složení povlaku 45CT od povrchu do základního materiálu (krok 20 μm)

	W%(C)	W%(Si)	W%(Ti)	W%(Cr)	W%(Mn)	W%(Fe)	W%(Ni)	W%(Cu)
1	0.0430	0.1470	0.5020	48.0650	0.1470	0.3520	50.2100	0.5020
2	0.0650	0.2010	0.4710	45.7000	0.1580	0.4090	51.4360	0.5080
3	0.1100	0.1660	0.6350	46.3200	0.1660	0.3695	51.4780	0.4760
4	0.0740	0.2220	0.5220	44.7840	0.1950	0.4080	52.2280	0.4500
5	0.0500	0.1380	0.7040	43.8740	0.1740	0.3620	53.6440	0.5110
6	0.0630	0.1840	0.5310	44.0350	0.1130	0.3300	54.0180	0.4610
7	0.0740	0.2010	0.4600	45.0000	0.1540	0.2990	53.3330	0.4400
8	0.0850	0.1750	0.5110	44.0000	0.1200	0.3200	54.0170	0.4760
9	0.0870	0.2550	0.0000	0.0220	0.5410	97.8950	0.0000	0.2140
10	0.1540	0.3300	0.0000	0.0130	0.7510	98.3270	0.0000	0.2700

Závěrečné zhodnocení

Dlouhodobé zkoušky vysokoteplotní koroze prokázaly velmi dobrou odolnost všech zkoušených povlaků. Byly porovnány i tři technologie nanášení povlaků – HVOF, plazma a nástřik elektrickým obloukem. U této poslední technologie se ve struktuře vyskytuje značné množství oxidických plen, vzniklých při dopadu roztavených kuliček nástřiku, na povrchu již oxidovaných. Na druhou stranu se jedná o nejlevnější technologii s možnou aplikací i na stávajících kotlech při přechodu na spalování rostlinné biomasy, příp. i pelettek TAP.

Poděkování

Výsledky prezentované v přednášce vznikly v rámci řešení projektu TAČR TK 01030089 „Odolnost a degradace slitin ve vysokoteplotním plynném médiu“. Autoři příspěvku děkují TAČR za finanční prostředky poskytnuté na daný výzkum.

Literatura

- [1] Brief on biomass for energy in the European Union. ec.europa.eu. [Online] [Cited: 8 31, 2020.] https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109354/biomass_4_energy_brief_online_1.pdf
- [2] Recent and abrupt increase in forest harvesting in Europe. ec.europa.eu. [Online] [Cited: 31 8, 2020.] https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/recent-abrupt-increase-forest-harvesting-europe_en
- [3] MICHELSEN H.p., FRANDSEN F., DAM-JOHANSEN K., LARSEN H. L. Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler. *Fuel Processing Technology*. 1998, Vol. 54, 1-3, 95-108.
- [4] OKSA M., AUERKARI P., SALONEN J., VARIS T. Nickel-based HVOF coatings promoting high temperature corrosion resistance of biomass-fired power plant boilers. *Fuel Processing Technology*. 2014, Vol. 125, 236-245.

POTENCIÁL VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PRO DIAGNOSTIKU A ÚDRŽBU V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

POTENTIAL OF THERMOGRAPHY FOR DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE IN POWER INDUSTRY

Michal Švantner a Milan Honner

Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt

Termografie je moderní diagnostická metoda s velkým potenciálem pro využití v diagnostice, údržbě, monitoringu nebo nedestruktivním testování energetických zařízení. K jejím hlavním přednostem patří její bezkontaktní a nedestruktivní charakter, možnost plošného testování a možnost kontroly nepřístupných nebo pohyblivých součástí. Příspěvek vychází z dlouholetých zkušeností a spoluprací pracoviště ZČU-NTC a zabývá se možnostmi termografických metod pro různé aplikace v energetice, např. diagnostika rotorů přečerpávacích elektráren, využití termografie pro testy únavových vlastností, zjišťování korozního poškození potrubních systémů v elektrárnách, prediktivní diagnostika poškození cyklicky namáhaných součástí nebo diagnostika v solárních technologiích. V příspěvku jsou představeny aplikace, termografické metody i potenciál pro jejich budoucí využití.

Abstract

Thermography is a modern diagnostics method with a significant potential for utilization in diagnostics, maintenance, monitoring, or non-destructive testing of power industry devices. The main advantages of thermography belong its non-contact and non-destructive basis, the possibility of area inspections, and a possibility of moving or hard-to-touch components. This contribution is based on long-term experiences and cooperation of the ZČU-NTC institute, and it deals with the possibilities of thermographic methods for different applications in the power industry. It describes thermography methods application, for example, for rotors diagnostics in pumped hydroelectric power plants, fatigue properties testing, identification of corrosion damage in pipe systems, predictive diagnostics of damage in cyclically loaded parts, or diagnostics in solar technologies. The contribution introduces applications, and thermographic methods, which potential in the power industry is discussed.

Úvod

Termografie je moderní diagnostická metoda využívající detekci infračerveného záření [1]. Jedná se o bezkontaktní, nedestruktivní a efektivní metodu, kterou lze pro diagnostiku strojů a zařízení využívat všude tam, kde je výskyt anomálií nebo závad spojen s tepelným projevem. K takovým tepelným projevům může v mnoha případech docházet i když je problém skrytý a je tak vnější indikací nejen rozvinutého, ale i počínajícího porušení nebo závady zařízení. Termografická diagnostika tak může významným způsobem přispět nejen k monitoringu provozu zařízení, ale také k prediktivnímu odhalování závad ještě před tím, než dojde k závažné poruše při provozu zařízení. V některých případech, kdy k tepelným projevům vlastní funkcí zařízení nedochází nebo nejsou dostatečné, lze využít vnějšího buzení a na základě tepelné odezvy testovaných komponent zkoumat jejich stav nebo výskyt defektů a závad. V těchto případech hovoříme o tzv. infračerveném nedestruktivním testování [2][3] s využitím aktivní termografie. Tato metoda tak dále rozšiřuje možnosti a potenciál infračervené termografie a termografické inspekce v oblasti diagnostiky, údržby a monitoringu strojů a energetických zařízení nebo nedestruktivního testování komponent a materiálů těchto zařízení.

K hlavním přednostem termografických metod patří jejich bezkontaktní a nedestruktivní charakter a možnost plošného testování. To umožňuje nejen laboratorní použití, ale také použití

přímo v provozech a kontroly nepřístupných nebo pohyblivých součástí. Příspěvek vychází z dlouholetých zkušeností pracoviště ZČU-NTC a zabývá se různými možnostmi využití termografických metod v energetice. V příspěvku jsou představeny aplikace zaměřené na klasickou energetiku, např. diagnostika rotorů přečerpávacích elektráren, zjišťování korozního poškození potrubních systémů v elektrárnách nebo prediktivní diagnostika poškození cyklicky namáhaných součástí, ale i na obnovitelné zdroje energie, např. možnosti diagnostiky ve fotovoltaických nebo koncentrátorových solárních technologiích. V příspěvku jsou představeny aplikace, termografické metody i potenciál pro jejich budoucí využití.

Aplikace

K významným a velmi namáhaným komponentám v energetickém průmyslu patří rotační zařízení. Případné závady rychle rotujících částí při běhu zařízení mohou vést k poruchám se značnými škodami. Může se jednat např. o rotory generátoru elektrárny, které jsou zejména při rozběhu značně namáhány. Anomálie ve funkci nebo projevy závady se přitom projevují zejména nebo pouze při provozu zařízení, což značně ztěžuje jejich detekci běžnými metodami. Pomocí vysokorychlostní termografické diagnostiky se vzorkovací frekvencí až 1 kHz v průběhu náběhu zařízení lze odhalit teplotní anomálie indikující na jednotlivých pólech rotoru, které indikují možný materiálový nebo konstrukční problém v daném místě.

K dalším aplikacím v klasické energetice patří zjišťování skryté / vnitřní koroze ocelových komponent [4]. Jedná se především o potrubí technické vody, ale také o části tepelných výměníků nebo ocelových výstelek. Ke koroznímu poškození (otvory, úbytky tloušťky stěny) dochází na vnitřní nebo skryté straně součástí, takže je obtížné je objevit při běžné údržbě a projev se většinou až při kritickém poškození. V těchto případech se nejvíce uplatňuje aktivní termografie, kdy při vhodném buzení (např. pomocí halogenových lamp) lze indikovat úbytek tloušťky materiálu bez zásahu do funkce zařízení. Velkou výhodou termografického testování je v tomto případě zejména bezkontaktnost, rychlost a plošná podstata, která umožňuje inspekci větších ploch a nabízí podklady k detailnější lokální inspekci objevených indikací, např. pomocí ultrazvukových metod. Podobné techniky aktivní termografie se pak využívají k inspekci tloušťky nebo úbytku tloušťky funkčních povlaků [5] případně jejich provozního poškození.

Významnou aplikací, kde jsou možnosti uplatnění termografické analýzy, je inspekce a diagnostika cyklicky namáhaných součástí. Ty se v průběhu provozu mohou poškodit buď únavovým mechanismem nebo vlivem materiálových příčin (ztráta mechanických vlastností, vznik a rozvoj trhlin v důsledku mechanického a tepelného namáhání apod.). Z tohoto důvodu je častý požadavek na provedení ověření vlastností materiálů nebo diagnostiku procesů při cyklickém namáhání. Termografická metoda může být použita pro zjišťování únavových vlastností materiálů [6], včetně např. vzorků s povlaky, při testech podobných klasickému únavovému testování. Ačkoliv metoda není normována a pro daný okruh úloh je tedy potřebné ověření výsledků standardními postupy, výhodou je zejména významně kratší čas experimentů a menší počet potřebných vzorků, tedy i zásadní snížení nákladů. Do kategorie technologických zkoušek pak patří inspekce procesů nebo konstrukcí při provozním nebo řízeném cyklickém namáhání [7], kdy lze pomocí termografické inspekce nalézt kritická místa nebo počátek iniciace plastického namáhání a trhlin v různých technologických testech.

Ke klasickým aplikacím s významným uplatněním termografických nástrojů v oblasti alternativních a obnovitelných zdrojů energie patří inspekce v solárních fotovoltaických technologiích. Termografická inspekce se uplatňuje od kroků vývoje a výroby solárních článků, kde se využívá pro infračervené nedestruktivní testování [8] se světelným nebo elektrickým buzením (často např. lock-in inspekce s LED buzením). Dále se uplatňuje v průběhu výroby pro kontrolu částí solárních panelů až po výstupní kontrolu, kdy se v zábleskových komorách

testuje výkon a provádí inspekce celých panelů. V neposlední řadě se pak termografická inspekce využívá při provozní kontrole již instalovaných panelů, kde slouží k odhalení vadných částí nebo příčin jinými metodami indikovaných problémů. V moderních solárních technologiích se pak objevuje možnost uplatnění termografické inspekce v oblasti kontroly součástí solárních koncentrátorových elektráren, např. při analýze rozložení teplotních polí pro optimalizaci, monitoring nebo řízení tepelných procesů nebo jako kontrola kvality pro inspekci homogenity tloušťky funkčních povlaků komponent těchto elektráren.

Shrnutí a závěr

Příspěvek přináší přehled aplikací termografické diagnostiky a inspekce v energetickém průmyslu. Uvedené aplikace z oblasti klasické (diagnostika rotačních součástí, identifikace korozního poškození, inspekce cyklicky namáhaných součástí) i obnovitelné energetiky (inspekce v solárních technologiích) ukazují široké možnosti uplatnění, kde se využívá hlavních výhod termografie, jako jsou bezkontaktní a nedestruktivní charakter inspekce, rychlost, možnost vzdálené inspekce a možnost inspekce rotujících nebo pohyblivých částí. V příspěvku nejsou jmenovány některé další aplikace, které se nezabývají přímo termografickou diagnostikou na součástech energetických zařízení, ale zcela jistě do této oblasti také patří. Jedná se např. o využití vysoko-emisivních barev pro úpravy teplosměnných ploch výměníků (a dalších zařízení) s cílem zvýšení optických radiačních vlastností, měření radiačních vlastností (emisivita, propustnost, odrazivost) materiálů využívajících se v energetických zařízeních nebo termodiagnostika při výrobě a zpracování komponent pro energetická zařízení.

Některé z uvedených aplikací jsou dlouhodobě prověřené a detailně popsány v odborných publikacích nebo existujících standardech. Lze však předpokládat, že s rozvojem termografické techniky a metod inspekce najde termografie uplatnění i v nových, moderních a dynamicky se rozvíjejících oblastech energetického průmyslu.

Poděkování

Práce vznikla za podpory projektu "LABIR-PAV / Předaplikační výzkum infračervených technologií" reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/001/0018 financovaného z EFRR.

Literatura

- [1] MEOLA, C., ed. *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*, Bentham Science Publishers, 2012, <https://doi.org/10.2174/97816080514341120101>
- [2] MALDAGUE, X.P.V., *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer London, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1995-1>
- [3] USAMENTIAGA, R., VENEGAS, P., GUEREDIAGA, J., VEGA, L., MOLLEDA, J., BULNES, F.G., *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, *Sensors*. 2014, vol. 14, issue 7, pp. 12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
- [4] CHULKOV, A.O., VAVILOV, V.P., Comparing thermal stimulation techniques in infrared thermographic inspection of corrosion in steel, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2015, vol. 81, pp. 012100. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012100>
- [5] ŠVANTNER, M., MUZIKA, L., HOUDKOVÁ, Š., Quantitative inspection of coatings thickness by flash-pulse thermography and time-power transformation evaluation, *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59, pp. E29–E35. <https://doi.org/10.1364/AO.388440>.

- [6] TESAŘ, J., ŠVANTNER, M., SKÁLA, J., HONNEROVÁ, P., NOVÁK, M., Thermographic method for fatigue limit determination at cyclic loading - Measurement procedure overview and validation, in: *Met. 2019 - 28th Int. Conf. Metall. Mater. Conf. Proc.*, 2019.
- [7] ŠVANTNER, M., SKÁLA, J., MUZIKA, L., ČÍŽEK, P., Thermographic detection of damage initiation of cyclically loaded parts, in: *QIRT 2018 - Proc. 2018 Int. Conf. Quant. InfraRed Thermogr., QIRT Council, Berlin*, 2018: pp. 953–954.
<https://doi.org/10.21611/qirt.2018.129>.
- [8] MUZIKA, L., ŠVANTNER, M., KUČERA, M., Lock-in and pulsed thermography for solar cells testing, *Appl. Opt.*, 2018, vol. 57, pp. D90–D97.
<https://doi.org/10.1364/AO.57.000D90>

VIZUÁLNÍ KONTROLY VN TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

VISUAL INSPECTIONS OF HV ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Petr Živný

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Vysokonapětové synchronní stroje jsou nejčastěji využívány jako generátory sloužící k výrobě elektrické energie nejen v jaderných elektrárnách, ale i klasických tepelných, větrných a vodních elektrárnách. Pro zajištění spolehlivé výroby a dodávky elektrické energie jsou součástí pravidelných diagnostických kontrol zařízení také vizuální inspekce. Diagnostické kontroly jsou podrobeny jednotlivé části stroje tak, aby byla odhalena případná závada včas a nebylo nutné generátor, potažmo celý blok elektrárny neplánovaně odstavit z důvodu poruchy.

Pro správné vyhodnocení stavu posuzovaných komponent je nezbytná celková znalost konstrukce stroje a technologie výroby společně se znalostí projevů rozvíjejících se vad, aby je bylo možné řádně lokalizovat. Na základě vyhodnocení zjištěného stavu jsou přijímána příslušná opatření přispívající ke zmírňování dopadů stárnutí sledovaných částí stroje. Monitorování a hodnocení celkového technického stavu generátoru probíhá prakticky po celou dobu jeho provozování s cílem průběžně hodnotit zbývající životnost zařízení.

Abstract

The high-voltage synchronous machines are very often used as generators for the production of electric power not only in nuclear power plants but also in conventional thermal, wind, and hydropower plants. Regular diagnostic equipment checks also include visual inspections to ensure reliable production and supply of the power. The individual parts of the machine are subjected to a diagnostic check so that a possible fault is detected in time, and it is not necessary to unplanned shutdown of the generator or complete unit of the power plant due to a fault.

For a correct evaluation of the condition assessed components, overall knowledge of the machine design and production technology, together with knowledge of the marks of developing defects, is necessary so that they can be detected in time. Based on the evaluation of the detected condition, appropriate measures are taken that contribute to reducing the effects of aging of the monitored machine parts. Monitoring and evaluation of the overall technical condition of the generator takes place practically throughout its operation with the aim of continuously evaluating the service life of the equipment.

Úvod

Hlavní pozornost v rámci tohoto článku je věnována vizuálním inspekčním vysokonapětových (VN) synchronních strojů, které jsou provozovány nejen jako generátory, ale v rámci přečerpávacích elektráren, také jako motor – generátory pohánějící reverzibilní turbíny. Na tyto stroje jsou v současné době kladeny obrovské nároky z pohledu jejich dostupnosti a spolehlivosti. Vlivem navyšování podílu výroby el. energie z fotovoltaických a větrných elektráren značně stoupla důležitost přečerpávacích elektráren z důvodu potřeby akumulace velkého množství přebytkové energie.

Obecně lze generátor popsat jako zařízení, které slouží k přeměně mechanické energie na elektrickou. Nejčastěji jsou využívány synchronní vysokonapětové točivé stroje poháněné turbínou. Turbína dodává generátoru potřebnou mechanickou energii, která je přenášena přes hřídel a spojku na rotor generátoru. Zde při průchodu stejnosměrného proudu rotorovým vinutím a otáčením rotoru je vytvářeno točivé magnetické pole. To přechází přes vzduchovou

mezeru do magnetického obvodu statoru, ve kterém se uzavírá magnetický tok. V magnetickém obvodu statoru je umístěno statorové vinutí, do kterého se indukují střídavé napětí. Vyrobená elektrická energie se následně z generátoru přenáší přes blokový transformátor do elektrické sítě. Konstrukční řešení generátoru, obdobně jako turbíny, vychází z konkrétních provozních parametrů a použití. Ve srovnání s turbínou je v generátoru použito mnohem více různorodých materiálů. Ve velké míře jsou zde zastoupeny i drahé kovy jako je například stříbro, různé druhy bronzů, měď a další.

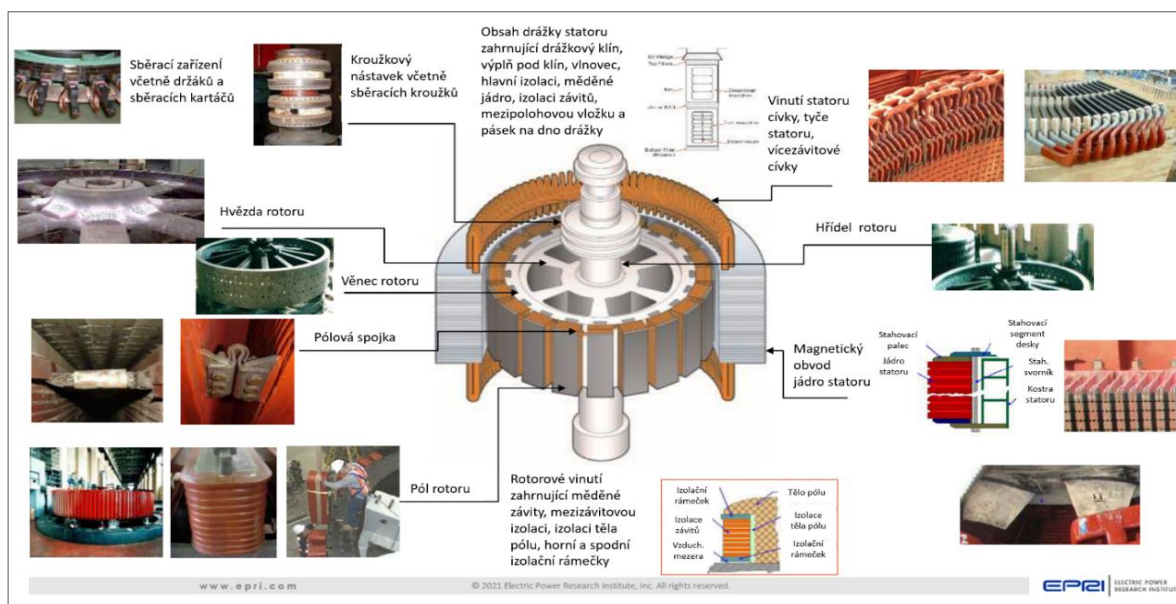
Z pohledu konstrukce je generátor poměrně složitý stroj, který musí být schopen dlouhodobě odolávat nejen mechanickému, ale i elektrickému a tepelnému namáhání. Jsou na něj kladeny vysoké nároky z pohledu spolehlivosti a bezpečnosti provozu, a proto musí být nejen bezchybně navrženy, ale i pravidelně zkoušeny a kontrolovány. Vizuální inspekce generátorů, je nedílnou součástí diagnostických kontrol, měření a zkoušek, které se provádí v pravidelných intervalech a rozsahu doporučených výrobcem. Jak stroj stárne, dochází k opotřebení a odčerpání životnosti některých částí. Proto je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost stopám počáteční degradace nebo částečnému poškození, které se v rámci následného provozu může rozvinout a vést až k havárii stroje. Diagnostika a inspekce je zaměřena na rotační i statické části. Rotační části jsou namáhány zejména mechanicky, kdy na ně působí vlivem jejich velké hmotnosti a vysoké obvodové rychlosti značná odstředivá síla. Statické části jsou namáhány střídavým elektrickým napětím, zvýšenou teplotou, vibracemi, nečistotami v chladicím médiu a jsou vystaveny působení specifických chemických látek. Vizuální kontrola stroje patří k nejjednodušším, ale velmi důležitým metodám sledování celkového stavu stroje [1].

Základní rozdělení VN synchronních generátorů

Synchronní generátory lze dělit dle různých kritérií. Primární dělení je dle typu stroje na hydrogenerátory a turbogenerátory. Hydrogenerátory jsou nejčastěji s vertikální osou rotace rotoru, naopak u turbogenerátorů je osa rotace rotoru horizontální. Rozměry generátoru vychází nejen z výkonu stroje, ale také z otáček turbíny a způsobu chlazení. Protože vodní turbíny dosahují nižších otáček než parní, musí být rotory hydrogenerátorů vícepólové, a proto jsou větších průměrů ve srovnání s turbogenerátory (tzv. turboalternátory). Jedná se o rychloběžné stroje, nejčastěji dvou pólové (někdy i čtyřpólové), které jsou konstruovány s válcovým rotorem s osovou délkou přesahující i 7 m [2].

Je vhodné též zmínit způsoby chlazení generátoru. Zde rozlišujeme stroje s vnějším chlazením, které se používá pouze pro malé výkony (ztrátové teplo je vyzařováno z povrchu žebrovaného pláště stroje) a stroje s vnitřním uzavřeným chladicím okruhem (vzduch procházející strojem odebírá ztrátové teplo z aktivních částí a následně ho předává chladicí vodě cirkulující v chladicích stroje). U těchto strojů je však převážně statorové vinutí chlazeno nepřímou (ztrátové teplo je odebíráno z povrchu izolace). Jedná se o nejrozšířenější způsob chlazení strojů menších výkonů. Pro zvýšení účinnosti chlazení a zvýšení elektroizolační pevnosti je u strojů středního výkonu používán jako chladicí médium vodík. Statorové vinutí může být obdobně jako u vzduchových strojů chlazeno nepřímou i přímo. V takovém případě prochází chladicí médium (vodík) statorovým vinutím speciálními chladicími kanály umístěnými v těsné blízkosti měděného jádra jednotlivých pólů. S přímým chlazením mohou být konstruovány i vývodní pasy a vývody generátoru. U strojů chlazených vodíkem je nezbytné zajistit celkovou těsnost všech jeho částí. Vodíková náplň stroje musí být v průběhu provozu stroje vysoušena, musí být regulován její tlak a teplota. Vodík jako chladicí médium však přináší určité komplikace, při koncentraci ve vzduchu 4 až 75 % vzniká výbušná směs. Proto je v rámci plynového hospodářství nezbytné řešit změnu náplně vnitřního prostoru generátoru ze vzduchu na oxid uhličitý a následně na vodík (při odstavení stroje se používá obrácený postup). Pro generátory největších výkonů je aplikováno chlazení kombinované, u většiny strojů se jedná převážně o přímé chlazení statorového vinutí demineralizovanou

vodou a chlazení všech ostatních částí je realizováno vodíkem, nebo ve výjimečných případech i vzduchem. U strojů s kombinovaným chlazením je k plynovému hospodářství a olejovému hospodářství mazacího a těsnicího oleje doplněno další příslušenství pro dodávku, chlazení, filtraci a monitoring demineralizované vody statorového vinutí.



Obr. 1 Popis vybraných základních částí hydrogenerátoru [5]

Vzhledem k velkému množství komponent, které jsou provozně namáhány, je nezbytné provádět jejich pravidelnou kontrolu a údržbu. Kontroly jsou realizovány formou on-line a off-line diagnostik po celou dobu životnosti kritických částí zařízení. Součástí off-line diagnostik jsou i vizuální kontroly, zaměřené na stav jednotlivých konstrukčních částí hodnoceného odstaveného stroje. Na základě zjištěných výsledků vizuálních inspekci jsou přijímány kroky pro odstranění zjištěných závad včetně provádění nápravných opatření.

Při vizuální inspekci jsou hodnoceny vybrané části statoru a rotoru generátoru. Současně jsou též kontrolovány i příslušenství generátorů, sběrací zařízení, budiče a další části, které mají zásadní vliv na chod stroje a v případě jejich poruchy mohou způsobit jeho neplánované dlouhodobé odstavení. Dle míry demontáže odstaveného stroje, konkrétní konstrukce a přístupnosti jednotlivých částí je vždy stanoven rámec prováděné inspekce.

S ohledem na rozsah vizuální kontroly realizované na VN točivých el. strojích, kde konstrukce čítá stovky položek, bylo v rámci tohoto článku vybráno pouze statorové vinutí, které je jednou z nejdůležitějších statických částí, podléhající vícefaktorovému namáhání.

Statorové vinutí

Za provozu generátoru se do statorového vinutí indukuje napětí a pokud statorem protéká proud vzniká točivý moment [3]. Izolační systémy generátorů velkých výkonů jsou navrženy s ohledem na jejich proudové zatížení (v jednotkách až desítkách kiloampér) a zároveň vysokonapěťové namáhání, kde sdružená napětí přesahují hladinu i 20 kV. Výkonové úrovně těchto strojů jsou pak v řádech stovek megawatt. Velmi často je statorové vinutí konstruováno jako třífázové, obvykle zapojené do hvězdy.

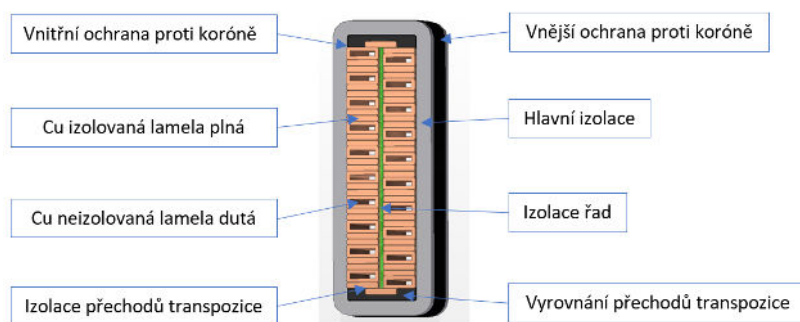
V rámci inspekce se statorové vinutí nejčastěji rozděluje na pět základních oblastí, které jsou hodnoceny samostatně a vždy vychází z konkrétního designu stroje. Hlavní částí jsou cívky a jejich izolační systém. Další hodnocenou oblastí je zaklínování statorového vinutí v drážkové části a výztužný systém čel statorového vinutí. Součástí inspekce statorového vinutí je i kontrola vývodních a spojovacích pasů včetně samotných vývodů statorového vinutí. Hlavní faktory ovlivňující vznik poruchového stavu vinutí jsou již u výrobce: samotný design vinutí a následně

kvalita výroby. V provozu velmi záleží na prostředí, v kterém je stroj provozován a současně na celkové údržbě stroje [4].

Cívky statorového vinutí

Oproti malým strojům na nízké napětí, kde jsou cívky tvořeny velkým počtem závitů z lakovaného vodiče navinutého do drážek magnetického obvodu vyložené drážkovou izolací, jsou cívky vysokonapěťových strojů pro velké výkony značně odlišné. Vinutí těchto strojů je nejčastěji dvouvrstvé, v některých případech jen jednovrstvé, založené do drážek magnetického obvodu statoru. Dle konstrukčního řešení se vinutí dělí na cívkové, tvořící jeden nebo více závitů, případně půlcívkové.

U strojů velkých výkonů jsou půlcívky vyráběny jako samostatné tyče, které z důvodu snížení ztrát jsou složeny ze vzájemně izolovaných a transponovaných vodičů Roebelovou transpozicí. Vlastní základ tyče obsahuje mimo izolovaných vodičů i poměrně velké množství kompozitních materiálů viz Obr. 2. Hlavní izolace je tvořena slídovým papírem prosyceným reaktoplastickou pryskyřicí a dle úrovně provozního namáhání nosnou skleněnou tkaninou případně PET nebo PEN fólií. Pro řízené elektrické pole je povrch izolace pokryt vodivými a polovodivými vrstvami, které určují jeho správné rozložení podél vinutí. Proti účinkům dynamických sil je vinutí nejen v drážkové části, ale i v čelech patřičně fixováno, aby bylo omezeno mechanické namáhání hlavní izolace a zároveň byla umožněna tepelná dilatace. Celý izolační systém také musí být vždy navržen i s ohledem na tepelné zatížení statorového vinutí. Pro zvýšení odvodu tepelných ztrát se používá přímé chlazení pomocí chladicích kanálů. Veškeré použité materiály musí odolávat všem faktorům namáhajícím statorové vinutí v průběhu provozu. Z řezu na Obr. 2 je patrné celkové rozložení jednotlivých částí tyče statorového vinutí.

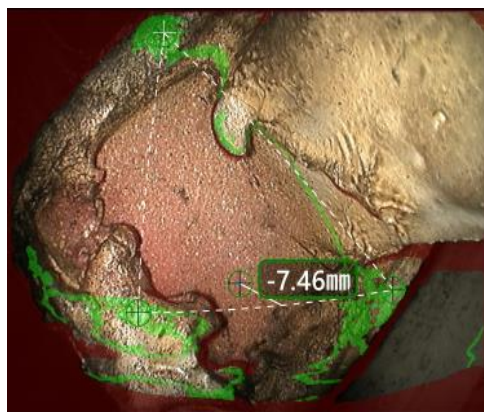


Obr. 2 Řez tyčí statoru VN synchronního generátoru s kombinovaným chlazením

Vizuálně je kontrolován stav statorového vinutí z pohledu možného mechanického a tepelného namáhání včetně známek výbojové činnosti. V drážkové části magnetického obvodu je kontrolováno zaklínování statorového vinutí drážkovými klíny, které fixují vinutí v radiálním směru. Na základě zjištění jsou následně prováděny diagnostická měření a zkoušky, které ověřují stav izolačního systému se zaměřením na zjištěné vady, jejich rozsah a vliv na následný provoz. V průběhu kontroly jsou sledována místa vykazující stopy po výbojové činnosti, případně lokálně zvýšenou teplotu izolace nebo její mechanické poškození. Důležitým bodem vizuální inspekce je i kontrola spojení spodní a horní polohy statorového vinutí. Kontrola je především zaměřena na delaminaci stěn izolačních pouzder a homogenitu jejich výplně tzv. zálivky. I zde jsou diagnostikovány stopy zvýšené teploty, trhliny v zálivce a delaminace konců hlavní izolace čel půlcívek. Pro inspekci nepřístupných míst statorového vinutí je velmi často využívána endoskopická kontrola viz Obr. 3b. Při zjištění vad, které jsou na povrchu a zasahují do hloubky izolační stěny jsou realizována i 3D měření tvaru poškození, aby bylo možné posoudit rozsah a závažnost vady včetně vlivu na spolehlivost provozu stroje. Rozsah kontroly je vždy omezen na přístupné části vycházející z konstrukce stroje a úrovně demontáže.



Obr. 3a Pohled na čela spodní polohy statorového vinutí v horní části generátoru



Obr. 3b Detail z endoskopické kontroly výplně izolačního pouzdra

Zaklínování statorového vinutí v drážkové části

Statorové vinutí je založeno v drážkách magnetického obvodu generátoru. Proti radiálnímu a tangenciálnímu pohybu je fixováno pomocí bočních výplní, vlnovců a klínů. V rámci generálních oprav, kdy dochází k demontáži rotoru generátoru, je přístupný vnitřní průměr jádra, a proto může být realizována kontrola tuhosti zaklínování drážkových klínů. Dle konstrukčního řešení podložení drážkových klínů je kontrolována akustická odezva či dynamická odezva, nebo stlačitelnost podložení klínu. Součástí kontroly je vždy mapa rozložení klínů včetně zjištěné tuhosti. Hodnoty jsou porovnány s definovanými kritérii minimální tuhosti a je určen návrh rozsahu opravy překlínováním. Při překlínování se u vinutí s reaktoplastickým izolačním systémem současně kontroluje i boční zaklínování. Zde je kontrolována vůle mezi bočním vyložení případně boční plochou cívky a stěnou drážky.

Výztužný systém čel statorového vinutí

Výztužný systém slouží k upevnění a podepření košů čel statorového vinutí. Zajišťuje jejich mechanickou odolnost nejen v rámci běžného provozu, ale i při přechodových stavech, jako jsou změny výkonu nebo zkrat. Konstrukční řešení výztužného systému musí však umožnit dostatečné proudění chladicího média čely vinutí tak, aby nedošlo k tepelnému přetížení izolace. U výztužného systému se provádí kontrola znečištění čelních prostor statorového vinutí. Dále je kontrolováno upevnění jednotlivých rozpěrek a výztuh čel cívek vinutí statoru. Sleduje se, zda nedochází k oteru vnějších vrstev izolační stěny hlavní izolace vinutí vlivem pohybu výztuh v prostoru mezi čely jednotlivých půlcívek. Dále jsou kontrolovány bandáže a úvazy zajišťující pozici vinutí a jejich prosycení. V prostoru mezi jednotlivými čely (nejen ve fázovém rozhraní) je kontrola zaměřena na přítomnost stop po výbojové činnosti. Cílem vizuální inspekce je včas odhalit vznikající defekt a předejít celkové destrukci výztužného systému nebo poškození hlavní izolace čel statorového vinutí.

Vývodní a spojovací pasy

Vývodní a spojovací pasy jsou určeny k vzájemnému propojení jednotlivých částí statorového vinutí a vyvedení výkonu na výstupní svorky stroje. Jsou nedílnou součástí statorového vinutí a jejich kontrola probíhá obdobně jako například kontrola čel statorového vinutí. Sleduje se rozsah znečištění, stopy po výbojové činnosti, delaminace izolace a známky zvýšené teploty. Kontrola je též zaměřena na vyztužení vývodních pasů, pozici rozpěrek, utažení svorníků a bandáží.

Vývody generátoru

Vývody generátoru jsou dle konstrukčního řešení různého provedení. V některých případech, převážně u starších typů strojů, se jedná pouze o naizolovaný měděný pas

procházející izolační vývodovou deskou, na jedné straně připojený na vývodní pasy a na druhé straně na sběrné pasy nebo zapouzdřené vývody. Stroje novější konstrukce jsou velmi často osazovány unifikovanými průchodkami, které jsou u strojů velkých výkonů doplněny o systém chlazení těla měděného svorníku tak, aby mohly přenášet až desítky kiloampér. Kontaktní plochy musí být geometricky naprosto přesné a čisté. Izolace průchodek pro vysoké úrovně napětí jsou v některých případech řešeny jako kondenzátorové s vnitřními elektrodami pro řízení el. pole. Hlavní pozornost je věnována přítomnosti stop po výbojové činnosti a zvýšené teplotě izolace i kontaktních ploch. Je prováděna kontrola dotažení šroubových spojů, u strojů chlazených vodíkem nebo s kombinovaným chlazením i těsnost svorníků a přírub. Kontaktní plochy jsou především posuzovány z pohledu kvality povrchové úpravy pokovením, geometrie a souososti s vývodními pasy.

Závěr

Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. se zabývá hodnocením stavu VN hydrogenerátorů a turbogenerátorů z pohledu nálezů z vizuálních inspekcí. Na základě zjištěných odchylek je definován odhadovaný rozsah případných poškození a jejich možný dopad na následující provoz. Výstupem vizuální inspekce generátoru je technická zpráva popisující výsledky zjištění, včetně doporučení nápravných opatření. Dle charakteru zjištěných vad jsou stanoveny i návrhy pro další sledování trendu vývoje vad nebo způsob řešení jejich opravy.

Cílem diagnostických kontrol a měření je zajištění spolehlivé výroby a dodávky elektrické energie, a proto je nezbytné řešit stav jednotlivých zařízení, které se na těchto činnostech podílejí. Kontrola stavu generátoru je z pohledu spolehlivosti a bezpečného provozu elektrárny stejně důležitá, jako například kontrola turbíny, a proto je třeba jí věnovat patřičnou pozornost. Vzhledem k nezbytné míře zkušeností a znalostí pracovníků provádějící vizuální kontroly jsou v rámci skupiny techniků, diagnostiků, správců, výzkumných organizací a výrobců realizovány odborné meetingy, školení a konference. Pro unifikaci provádění vizuálních inspekcí byl vytvořen návrh metodiky s nastavením rozsahu a kritérií hodnocení stavu jednotlivých komponent. Včasná identifikace vad je téměř vždy spojena se značnou úsporou času a finančních nákladů souvisejících s jejich následným odstraněním.

Dnešní trend kontrol a měření jednotlivých částí generátorů se posouvá k robotickým inspekčním, které snižují jejich časovou a finanční náročnost. Velkou výhodou robotických inspekcí je menší rozsah demontáže stroje a možnost kombinovat více činností současně. V budoucnu se dá očekávat jejich masivnější využívání. Pravidelně prováděnou diagnostikou vedoucí na včasné odhalení vznikajících vad a cílenou údržbou je možné zvýšit bezpečnost provozu včetně prodloužení životnosti stroje.

Literatura

- [1] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel a TRNKA, Pavel. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 439 s ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] BARTOŠ, Václav, a kol. Elektrické stroje, Západočeská univerzita, Plzeň 2006. 139 s ISBN 80-7043-444-9.
- [3] BARTOŠ, Václav, Teorie elektrických strojů, Západočeská univerzita, Plzeň 2009. 229 s ISBN 978-80-7043-509-0.
- [4] STONE, Greg C., BOULTER, Edward A., CULBERT, Ian, DHIRANI, H. Electrical insulation for rotating machines, IEEE, 2004.643 s.
- [5] MOORE, Bill, EPRI – CEZ Advisory Meeting Follow Up, EPRI Program 220 Generators and Auxiliaries, Virtual Meeting 2021.

DIGITÁLNÍ DVOJČE ENERGOBLOKU DOMORADICE

DIGITAL TWIN OF POWER BLOCK DOMORADICE

Miloslav Popovič ^{a)}, Jakub Oravec ^{a)} a Martin Sánka ^{b)}

^{a)} SVS FEM s.r.o., Trnkova 3104/117c, 628 00, Brno, Czech Republic

^{b)} EKOL s.r.o., Křenová 65, 602 00, Brno, Czech Republic

Abstrakt

Životnost průmyslových jednotek je klíčovým parametrem v provozu i ve fázi jejich projektování. Digitální dvojče kombinuje obojí. Konstrukční modely založené na běžném standardu MKP simulací nemusí končit výrobou sestavy výkonového bloku, ale mohou dále fungovat v provozu a napomáhat tak k přesnější predikci životnosti reálného zařízení. Numerický model je již řadu let vhodný pro posouzení konkrétního stavu zatížení celého zařízení, ale technologie digitálního dvojčete umožňuje využít tyto informace v běžném provozu, kdy obsluha zařízení dostává přesnou hodnotu životnosti zařízení na základě historie skutečných podmínek zatížení a očekávaného budoucího provozu. Cílem tohoto výzkumu je vytvořit digitální dvojče pro monitorování, predikci a řízení životnosti turbín na základě metamodelů získaných ze softwaru optiSLang. Konstrukce metamodelů je založena na desítkách předpočítaných variant MKP výpočtů turbíny v softwaru Ansys. Software SVS Digital Twin poté komunikuje s PLC a je schopen číst data v reálném čase, zpracovávat je a následně přenášet zpět do PLC.

Abstract

The service life of industrial units is a crucial parameter in operation as well as in their design phase. A digital twin combines both. Design models based on the common standard of FEM simulations do not have to end in the production of a power block assembly but can continue to function in operation and thus help in more accurate prediction of the lifetime of real equipment. For many years, the numerical model has been suitable for assessing the specific load status of the entire equipment, but the digital twin technology makes it possible to use this information in normal operation when the operator of the equipment receives an accurate value of the lifetime of the equipment based on the history of actual load conditions and expected future operation. The aim of this research is to create a digital twin for monitoring, predicting, and controlling turbine lifetime based on metamodels obtained from the optiSLang software. The construction of the metamodels is based on dozens of precomputed variants of FEM calculations of the turbine in Ansys software. The SVS Digital Twin software then communicates with the PLC and can read the data in real-time, process it, and then transmit it back to the PLC.

Creation of the metamodels

FEM models

The calculation is divided into two steps - the calculation of the transient temperature problem and then the static problem, in which the temperature distribution found in the temperature problem will be input as the load. A separate model is created for both steps. The aim is to create a reduced model for different temperature transitions describing the physical processes in the turbine casing in terms of its strength, durability and deformation. Specifically, this involves checking for plastic deformations in the bolts, maximum life loss and then checking for deformations in the stator blade carriers.

In the model, selected nodes are placed approximately at the locations of the thermosensors on the real turbine. The temperatures at these nodes will be used as control parameters for the

digital twin model - the measured temperatures and their rate of change on the real turbine will be compared with these calculated values.

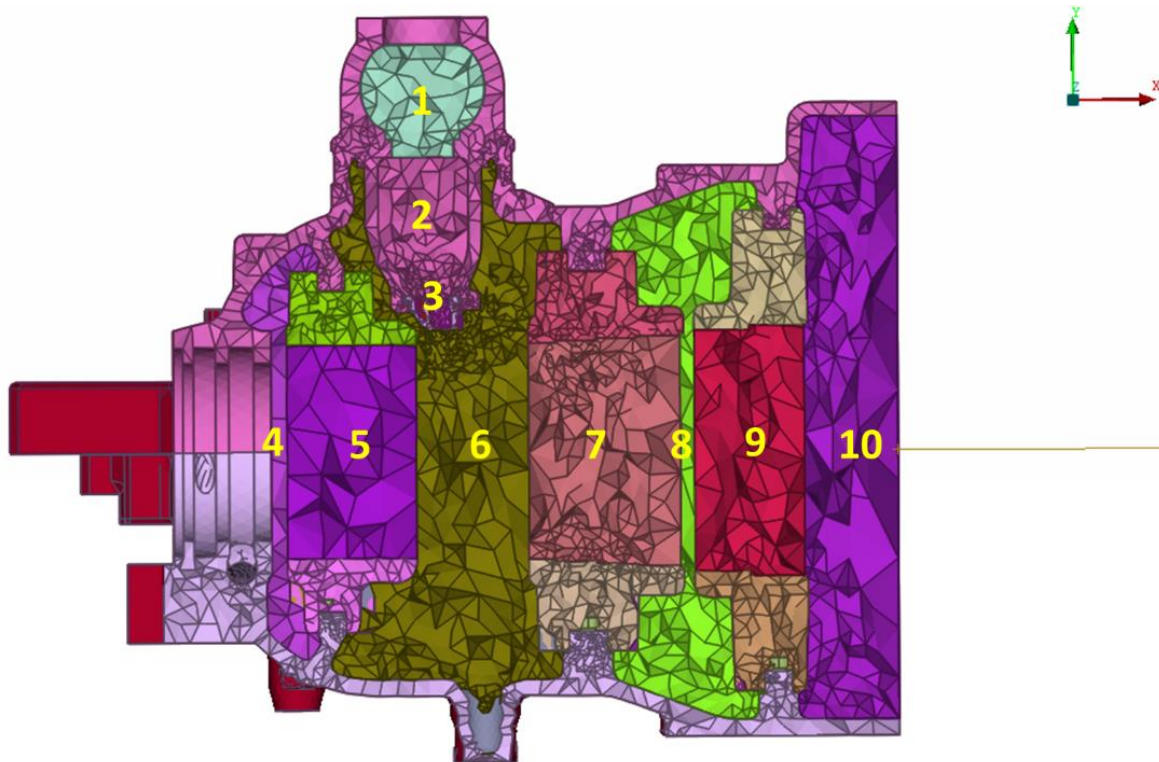


Figure 1. Section through the turbine model

Functional mockup unit

The Functional Mock-up Interface is a free standard that defines a container and an interface to exchange dynamic models using a combination of XML files, binaries and C code zipped into a single file. It is intended to be used in computer simulations to develop complex cyber-physical systems. A component which implements the FMI is called a Functional Mockup Unit (FMU). An FMU is intended to be a portable, dynamic simulation model for exchange or co-simulation

It consists of one zip-file with extension “.fmu” containing all necessary components:

- An XML-file that contains the definition of all variables of the FMU that are exposed to the environment in which the FMU shall be used
- A set of C-functions is provided to execute model equations for the Model-Exchange case and to setup and run the slaves for the Co-Simulation case
- Further data can be included in the FMU zip-file, especially a model icon (bitmap file), documentation files, maps and tables needed by the model, or all object libraries or DLLs that are utilized

In our case, a dynamic model exchange system based on differential equations was created based on the metamodels, which can be exported to FMU format using Optislang.



Figure 2. Procedure for creating a metamodel for a digital twin using Ansys software

Digital twin

The digital twin of the turbine is located in the Domoradice power plant. Its core is SVS Digital Twin software. It is an interface created in SVS FEM, which ensures communication and data transfer between the FMU and the machine for which the digital twin was created. On the power unit plant side, it communicates with a programmable logic controller (PLC), which monitors the current state of the machine in real time using sensors and reacts to this state in some way, for example by reducing the machine speed. It can also be told how to react to this state by the operator directly in the control room, by a user with a smartphone or by a user with a smartwatch. It just depends on what technology the PLC has and how it is able to exchange data with the environment.

The communication of the digital twin with the PLC is done using the OPC Unified Architecture (OPC UA) protocol. It is an industrial M2M (machine-to-machine) communication standard. It is a technology based on commonly used communication standards such as TCP/IP, HTTP and SOAP.

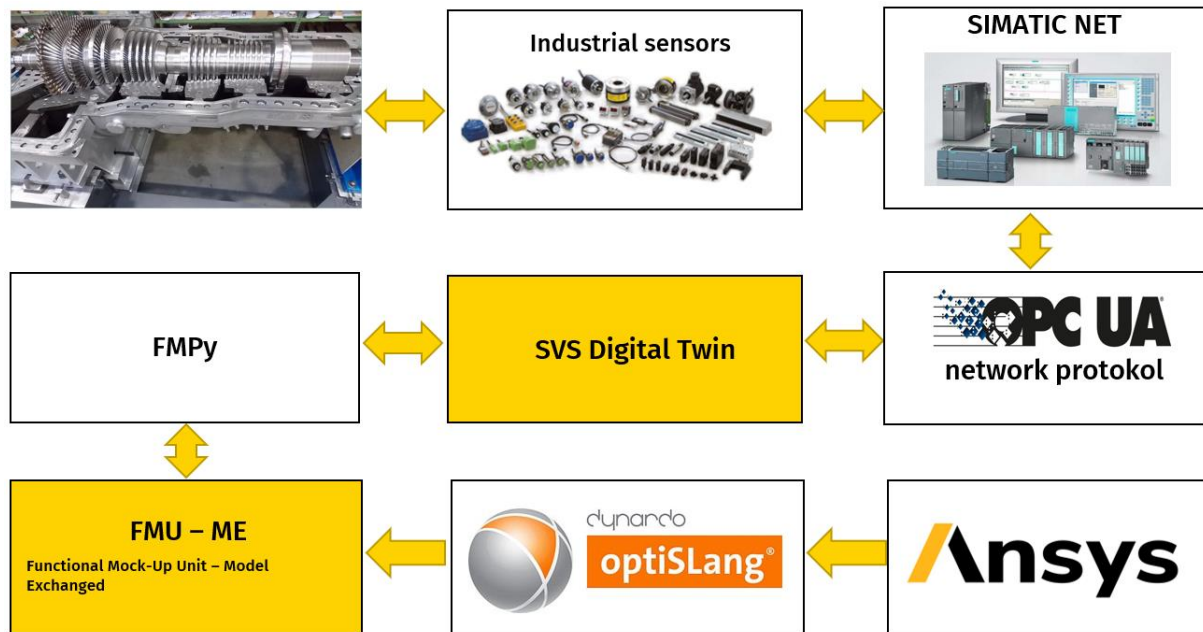


Figure 3. Diagram of digital twin

When operating conditions change, the digital twin retrieves the current data from the PLC. Based on the generated FMU, it performs an evaluation and then sends the evaluated data back to the PLC via the OPC UA. the time step in which the evaluation occurs is in the order of seconds in common applications, such short calculation times are made possible by the use of FMU reduced metamodels from FEM simulations. The digital twin is implemented as a background service that can monitor the turbine throughout its whole life cycle.

Conclusion

A digital twin of the steam turbine located at the Domoradice power plant has been created. The digital twin can monitor and predict plastic deformations in the bolts, maximum life loss and deformations in the stator blade carriers of the turbine. To predict these values, it uses reduced metamodels created from FEM simulations in Ansys software.

VODÍKOVÉ TECHNOLOGIE JAKO NÁSTROJ DEKARBONIZACE EKONOMIKY ČR

HYDROGEN TECHNOLOGY AS A TOOL FOR DECARBONIZATION OF THE ECONOMY OF THE CZECH REPUBLIC

Aleš Doucek

ÚJV Řež, a.s.

Abstrakt

Přednáška si klade za cíl představit vizi využití vodíkových technologií pro naplňování aktuálních cílů dekarbonizace ekonomiky ČR a snižování energetické závislosti. Bude přestaven aktuální stav klíčových technologií. Na příkladech konkrétních projektů a záměrů z ČR a zahraničí bude vysvětlena komplexnost tematiky vodíkového hospodářství.

Abstract

The aim of the lecture is to present a vision of the use of hydrogen technologies to fulfill the current goals of decarbonizing the Czech economy and reducing energy dependence. The current state of key technologies will be rebuilt. The complexity of the topic of hydrogen economy will be explained using examples of specific projects and plans from the Czech Republic and abroad.

VODÍK A COLD SPRAY

HYDROGEN AND COLD SPRAY

Ondřej Chocholatý a Lucie Jarolímová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

Abstrakt

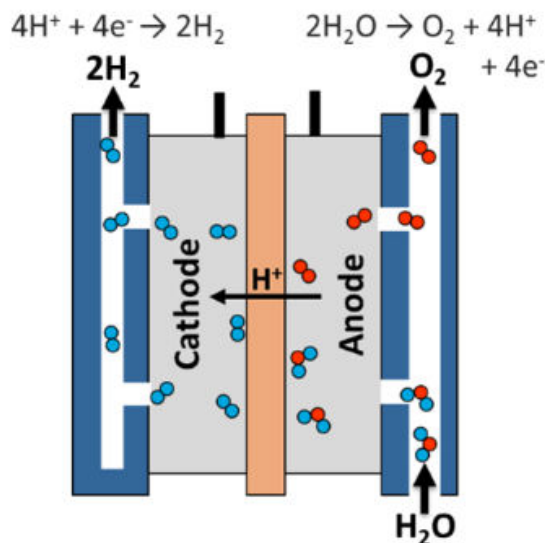
Cold Spray (CS) je nejmodernější metodou ze skupiny žárových nástřiků. Technologie spočívá v urychlení mikroskopických částic na několikanásobnou rychlost zvuku a jejich depozici na substrát, kde dojde v okamžiku dopadu k přeměně kinetické energie na deformační a tepelnou. CS technologii lze využít i pro 3D tisk. Takto připravené materiály nacházejí uplatnění ve vodíkovém hospodářství. CS je vhodný pro výrobu a povlakování elektrod elektrolyzérů využívaných ve výrobě vodíku. Technologie CS také nalézá využití pro výrobu součástek z materiálů, které odolávají vodíkové křehkosti.

Abstract

Cold Spray (CS) is state-of-the-art technology in the family of thermal spraying. The principle of this technology is to accelerate microscopic particles to a very high speed and deposit them on a substrate where the kinetics energy is converted into deformation and thermal energy. CS can also be used for additive manufacturing. CS is suitable for the production and coating of electrodes of electrolyzers used in hydrogen production. CS technology also finds applications for the production of components made of materials that resist hydrogen embrittlement.

Úvod

Vodík je nejlehčí plynný chemický prvek, který nachází velmi široké využití v průmyslu. Je považován za důležitý nosič při skladování energie, umožňující lepší využití výhod obnovitelné a udržitelné energie. V přírodě není snadno dostupný, je však možné ho získat z různých zdrojů, a to jak obnovitelných (vodní, větrné, solární, biomasové a geotermální) tak i neobnovitelných (uhlí, jaderná energie a zemní plyn). V současné době výrazně převažuje výroba vodíku z fosilních paliv, tzv. parním reformingem zemního plynu. Vodík je netoxický a v přepočtu na hmotnost obsahuje mnohem více energie (33.3 kWh/kg) než kterákoliv jiná látka, jako je např. zemní plyn (13,9 kWh/kg), benzín (12.8 kWh/kg) nebo uhlí (8.2 kWh/kg). [5]. Nejslibnější a také komerčně nejvyspělejší technologií pro uskladnění vodíku je v současné době využíváno stlačování vodíku v plynném skupenství. Takto uchovaný vodík má však vzhledem k velmi malé velikosti molekuly tendenci unikát. Z tohoto důvodu jsou moderní zásobníky vyrobeny z mimořádně pevných a neprodyšných materiálů [6]. Vodík navíc kvůli svému malému atomovému poloměru snadno interaguje s krystalovou mřížkou kovů běžně používaných ve strojírenství, čímž může výrazně snížit jejich mechanické vlastnosti [7].

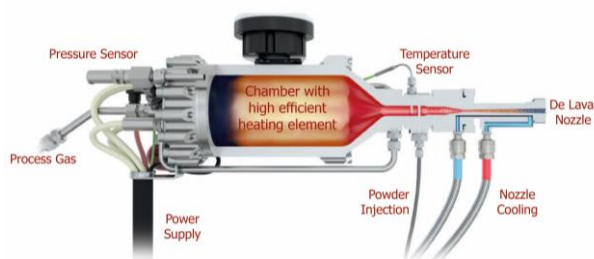


Obr. 1 Výroba H₂ [8]

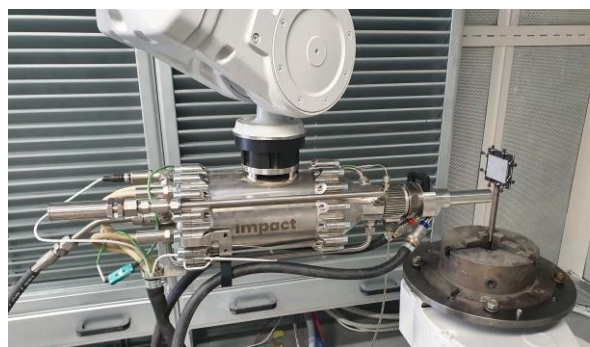
Cold Spray

CS je moderní a velmi zajímavá technologie, která patří do rodiny žárových nástřiků. Princip spočívá v urychlení mikroskopických částic (cca 5–50 μm) na několikanásobnou rychlost zvuku. Jako procesní plyn je využíván dusík, nebo helium, který je pod tlakem až 50 bar přiváděn do CS pistole. Ta je zahřáta na max 1100 °C. Následná expanze ohřátého a vysoce natlakovaného plynu v trysce vede ke zrychlení procesního plynu. Deponované prášky jsou podávány do trysky z práškového podavače. Částice se při dopadu na substrát deformují a vytvářejí silně kohezní povlak s velmi nízkým obsahem oxidů. Obr. 2, Obr. 3.

Vysoká kinetická energie částic a s ní spojený vysoký stupeň deformace při dopadu na substrát umožňuje výrobu homogenních povlaků. Rozsah tloušťky povlaku se pohybuje od setin milimetrů až po několik centimetrů. Fyzikální a chemické vlastnosti vrstev připravených pomocí CS se téměř neliší od vlastností konvenčně vyrobených materiálů.



Obr. 2 CS – princip [4]

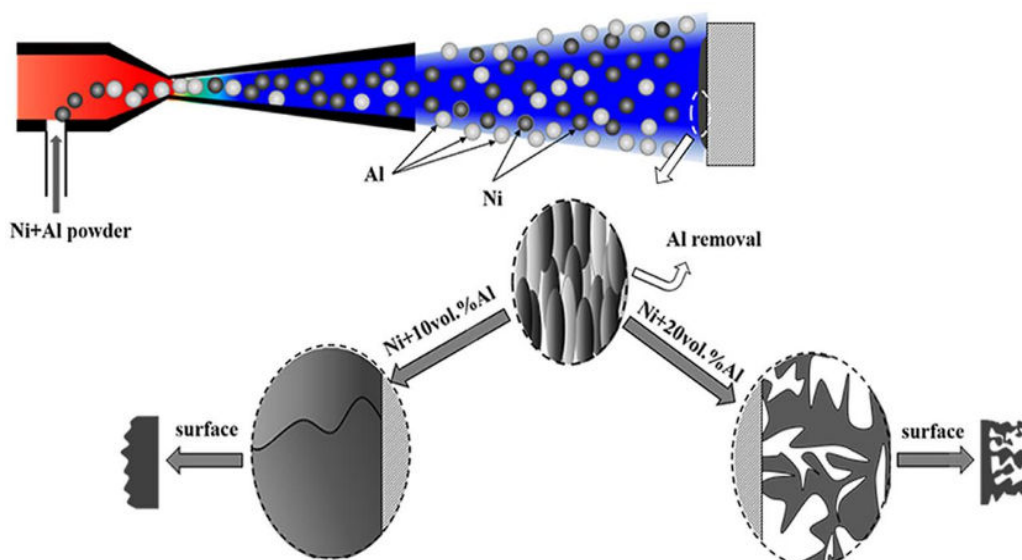


Obr. 3 CS – VZÚ Plzeň

Během procesu nedochází k natavení, ani roztavení deponovaného materiálu. Tepelný vliv jak na povlak, tak na základní materiál je minimální. Depoziční účinnost CS technologie přesahuje 95 %, což umožňuje snížení spotřeby surovin v porovnání s ostatními technologiemi žárových nástřiků.

Využití CS ve vodíkovém hospodářství

Při základní elektrolýze vody prochází stejnosměrný proud katodovými a anodovými elektrodami umístěnými ve vodivém elektrolytickém roztoku a rozkládá vodu na vodík a kyslík. Tento proces je poměrně náročný na energii, proto výroba vodíku ve velkém měřítku tímto způsobem je ekonomicky neatraktivní. Energetickou účinnost elektrolýzy vody však lze zlepšit snížením nadměrných potenciálů vývoje vodíku a kyslíku, které se významně podílejí na energetických ztrátách článků. Použitím vysoce vnitřně aktivních elektrodových materiálů se snižují vnitřní ztráty napětí a zvyšuje se účinnost reakce vývinu vodíku. Jedním z těchto materiálů je nikl, který je široce používán jako elektrodový materiál pro elektrolýzu alkalické vody díky své vysoké elektrokatalytické aktivitě, dostupnosti, stabilitě v alkalických roztocích a relativně nízké ceně. Kromě výběru materiálu má významný vliv také fyzikální morfologie elektrody. Větší efektivní povrch elektrody zvětšuje reakční plochu tím, že poskytuje větší rozhraní elektroda-elektrolyt, snižuje provozní proudovou hustotu a přispívá k vyšší elektrokatalytické aktivitě. [9] Díky technologii CS je možné takto upravit niklové elektrody tím, že se na povrch elektrody řízeně přidává hliník vytvářející 3D pórovitě struktury, [10,11]



Obr. 4 Schéma vzniku 3D strukturovaného povlaku [12]

Z hlediska morfologie povrchu lze pomocí CS upravit povrch katalyzátorů používaných při výrobě vodíku, například depozicí $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vrstvy. Další oblastí, kde nachází CS využití je 3d tisk výrobků z materiálů, které jsou odolné proti navodíkování a praskání způsobené vodíkem.

Závěr

Technologie CS je ve vodíkovém hospodářství využívána zejména při výrobě a povrchových úpravách elektrod a katalyzátorů při výrobním procesu vodíku. Další možné využití je při budování infrastruktury.

Literatura

- [1] Fan ZHANG, Pengcheng Zhao, Meng Niu, Jon Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 33, 2016, Pages 14535-14552, ISSN 0360-3199
- [2] RIVARD, Etienne, TRUDEAU, Michel,nd ZAGHIB, Karim. Hydrogen Storage for Mobility: A Review, *Materials*, 2019 12, no. 12: 1973. <https://doi.org/10.3390/ma12121973>
- [3] ABDALLA M., Abdalla, HOSSAIN, Shahzad, NISFINDY, Ozzan B, AZAD, Atia T., DAWOOD, Mohamed, AZAD, Abul K. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review, *Energy Conversion and Management*, 2018, Volume 165, Pages 602-627, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>.
- [4] Cold Spray Technology. <https://impact-innovations.com/en/technology/> (accessed Sept 08, 2022)
- [5] EDWARDS, Peter, KUZNETSOV, Vladimir L. and DAVID, William I. F. Hydrogen energy, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, vol. 365, p. 1043 – 1056, <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>
- [6] HYTEP Česká vodíková technologická platforma. *Základní informace o vodíku* [online], [vid. 9.9.2022] Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [7] BARRERA, O., BOMBAC, D., CHEN, Y. et al. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum. *J Mater Sci* 53, 6251–6290 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1978-5>
- [8] Energy Efficiency & Renewable Energy. *Hydrogen production: Electrolysis* [online], [vid. 9.9.2022] Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [9] AGHASIBEIG, Maniya, MONAJATIZADEH, Hossein, BOCHER, Philippe, DOLATABADI, Ali, WUTHRICH, Rolf, MOREAU, Christian. Cold spray as a novel method for development of nickel electrode coatings for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, Volume 41, Issue 1, Pages 227-238, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.123>.
- [10] JIANG X.G., SONG J.W., WANG X.B., SONG, C., XIE Z.C., LIU T.K., DENG C.M., LIU M., ZHANG N.N., LIAO H.L., Improved 3D porous structures of Ni electrodes prepared by high-pressure cold spray and post Annealing for water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, issue 27, pages 13226-39, ISSN 0360-3199.
- [11] AGHASIBEIG, Maniya, MONAJATIZADEH, Hossein, BOCHER, Philippe, DOLATABADI, Ali, WUTHRICH, Rolf, MOREAU, Christian, Cold spray as a novel method for development of nickel electrode coatings for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 1, 2016, Pages 227-238, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.123>.
- [12] JIANG, X.G., ZHANG, Y.P., SONG, C., XIE, Y.C., LIU, T.K., DENG, C.M., ZHANG, N.N., Performance of nickel electrode for alkaline water electrolysis prepared by high pressure cold spray, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, Volume 45, Issue 58, Pages 33007-33015, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.022>.
- [13] WANG G., WANG F., LI L., ZHAO M., Methanol steam reforming on catalyst coating by cold gas dynamic spray, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, Volume 41, Issue 4, Pages 2391-2398, ISSN 0360-3199

VÝVOJ MOBILNÍ PLNICÍ VODÍKOVÉ STANICE

THE DEVELOPMENT OF A MOBILE HYDROGEN FILLING STATION

Pavel Polach ^{a)}, Jan Kulas ^{b, c)} a Josef Lexa ^{d)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

^{c)} Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

^{d)} DEVINN s.r.o.

Abstrakt

Česká republika se vzhledem k přijetí tzv. Pařížské dohody o změně klimatu zavázala snížit emise skleníkových plynů (především oxidu uhličitého) do roku 2030 o 55 % oproti roku 1990. 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 probíhá vývoj prototypu polního zařízení na rozvoz a výdej vodíku, mobilní plnicí vodíkové stanice, která bude významným doplňkem stacionárních stanic a umožní urychlení rozvoje nízkoemisní mobility.

V příspěvku jsou shrnuty základní parametry prototypu mobilní stanice a legislativní a technické požadavky, které musí splňovat.

Abstract

Due to the adoption of the so-called Paris Agreement on climate change, the Czech Republic has committed to reducing greenhouse gas emissions (mainly carbon dioxide) by 55 % until 2030 compared to 1990. 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, developing a prototype field device for the distribution and dispensing of hydrogen, a mobile hydrogen filling station, is underway, which will be an essential addition to stationary stations and will enable the development of low-emission mobility to be accelerated.

The paper summarizes the basic parameters of the mobile station prototype and the legislative and technical requirements that must be fulfilled.

Úvod

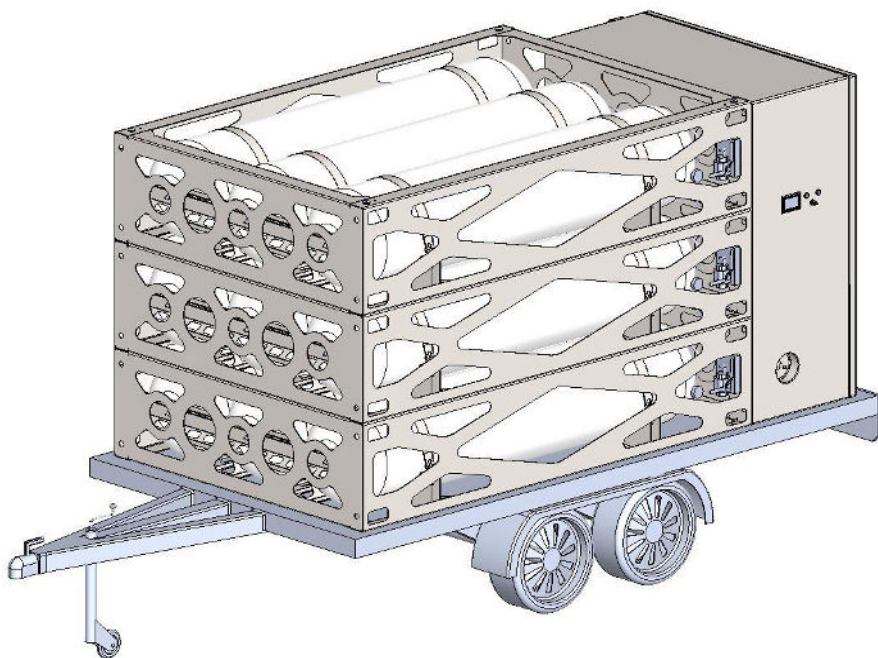
Snížení emisí oxidu uhličitého z dopravního sektoru je jedním z prostředků, jak snížit celkové emise skleníkových plynů, a tím přispět k dekarbonizaci všech sektorů do roku 2050 (viz např. [1]). S ohledem na strategii dekarbonizace dopravního sektoru, a to jak v hromadné, osobní i nákladní dopravě, je nezbytné pro vodíkové technologie zajistit dostatek lokalit pro doplnění paliva. Vybudování stacionární plnicí stanice (viz např. [2]) trvá od záměru po realizaci 2 až 3 roky, je finančně nákladné a vyplatí se pouze v určitých lokalitách. Z tohoto důvodu probíhají činnosti na vývoji mobilní plnicí vodíkové stanice, jejímž účelem je stát se doplňkem stacionárních plnicích stanic – tzn. poskytnout stejnou službu a zajistit ji lokalitách, které nejsou nebo v nejbližší době nebudou pokryty stacionárními stanicemi. Jedná se např. o odlehlá místa, areály firem a všechny koncové zákazníky, kteří chtějí získat provozní zkušenosti s plnicí a vozidly, např. dopravní podniky, pošta, městské služby a další.

Vyvíjená stanice bude sloužit jednak pro plnění vozidel, ale také pro plnění mobilních elektrocentrál s vodíkovým palivovým článkem, které návazně mohou plnit funkci mobilních nabíjecích stanic pro elektromobily nebo nezávislého zdroje elektrické energie.

Mobilní plnicí vodíková stanice

Výstupem probíhajícího vývoje a výzkumu bude, jak již bylo uvedeno, prototyp mobilní plnicí vodíkové stanice [3].

Mobilní plnicí stanice umožní plnit autobusy (nákladní automobily) s provozním tlakem vodíku 350 bar a osobní automobily s provozním tlakem vodíku 700 bar. Zařízení na plnění výdej a rozvoz vodíku obsahuje zásobník na stlačený vodík sestávající se ze soustavy sekcí tlakových nádrží/lahví, s dimenzovaným systémem kaskádových rozvodů a unikátním řídicím systémem pro maximální využití vodíku ze zásobníku. Vysokotlaký mobilní zásobník bude realizován ze svazku 9 tlakových lahví o tlaku až 500 bar a bude umožňovat uskladnit dostatečné množství vodíku. Tento svazek bude univerzální a bude jej možné použít i u stacionárních plnicích stanic. Svazek bude umístěn v rámu, který bude zajišťovat bezpečnost lahví a jejich správnou funkci.

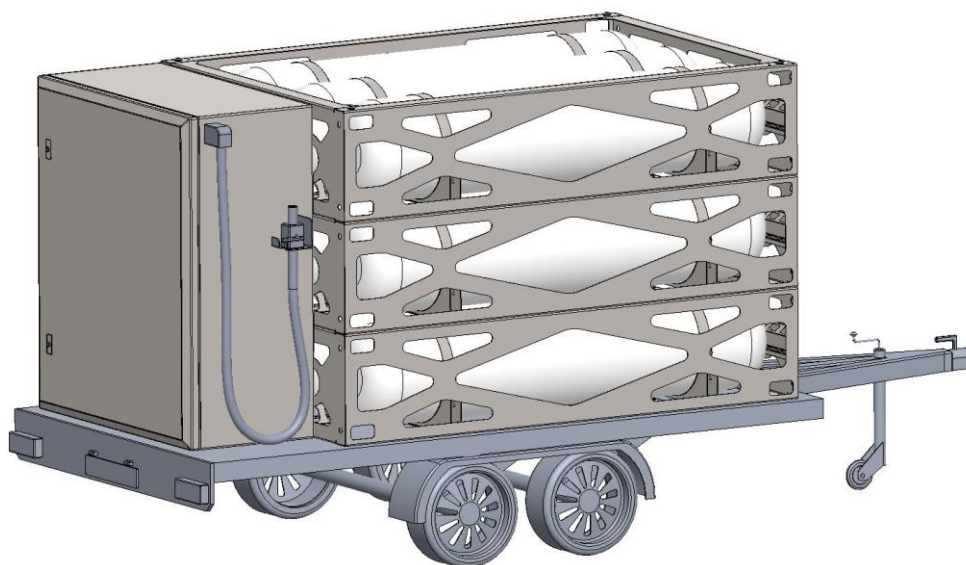


Obr. 1: Předpokládaná vizualizace přívěsu s mobilní plnicí vodíkovou stanicí

Svazky jednotlivých tlakových úrovní budou propojeny pomocí funkčních armatur (elektromagnetické ventily, filtry, redukční ventily, pojistňovací ventily, vysokotlaké vedení atd.). Jsou uvažovány 2 varianty počtu sekcí: 3 sekce (každá sekce sestává ze 3 tlakových lahví) nebo 4 sekce (2 sekce o 3 tlakových lahvích, jedna se 2 lahvemi a jedna sekce obsahující pouze jednu láhev). Plnění zásobníků na stlačený vodík bude prováděno ve veřejných či zasmělněných plnicích stanicích s tlakovou úrovní 350 či 700 bar. Pro maximální využitelnost mobilní plnicí vodíkové stanice je preferované plnění zásobníků z 700 barové stacionární plnicí stanice.

Po odborném posouzení více možných variant technických parametrů byly jako optimální zvoleny parametry:

- maximální provozní hmotnost mobilní stanice = 3 500 kg,
- celková hmotnost tlakových lahví = 1 800 kg,
- maximální hmotnost vodíku v tlakových lahvích = 97,2 kg,
- hmotnost ovládacího příslušenství = 300 kg,
- hmotnost rámu = 600 kg,
- pracovní tlak plnicí vodíkové stanice = 500 bar (15 °C),
- rozměry rámu: šířka = 2 m, výška = 2 m, délka = 3 m.



Obr. 2: Předpokládaná vizualizace přívěsu s mobilní plnicí vodíkovou stanicí – jiný pohled

Po identifikaci vhodných nádrží/lahví vodíku byl zahájen vývoj dokumentace pro výrobu prototypu mobilní plnicí vodíkové stanice.

Aby bylo možné zásobníky přepravovat, bude je nutné zastavět do vhodného rámu, který bude splňovat požadavky na pevnost, životnost, minimalizaci přenosu vibrací, dilataci vlivem teplot a změny tlaků a zejména na bezpečnost celého systému. Tyto požadavky jsou ověřovány s využitím počítačových simulací na vytvořených virtuálních modelech. Bude provedeno i posouzení systému s ohledem na zóny s nebezpečím výbuchu – ATEX (Equipment for potentially explosive atmospheres).

Celý systém bude umístěn na nákladním přívěsu s nástavbou (viz obr. 1 a obr. 2). Tímto bude možné využít systém jako dočasnou plnicí stanici při kulturních, společenských či sportovních akcích. Přívěs bude splňovat předpisy ADR (Accord Dangereuses Route, tj. Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí) pro přepravu nebezpečného nákladu (tlakový vodík).

Bylo již ověřeno, že systém mobilní plnicí vodíkové stanice integrovaný do přívěsu bude splňovat podmínky pro provoz na pozemních komunikacích, zejména že splňuje předpisy EHK, je v souladu s normami SAE (např. [4]) a že vybavení nástavby splňuje již zmíněné ADR předpisy. Předpokládá se, že přívěs bude možné přepravovat osobním automobilem v kategorii do 3,5 t. Existuje však určitá nejistota v této hmotnostní kategorii, proto bude součástí další analýzy posouzení cílové kategorie systému přívěs-automobil z hlediska provozu na pozemních komunikacích dle předpisů Evropské unie.

Po nadefinování technických parametrů bylo nutné stanovit provozní parametry plnicí stanice. Cílový mechanismus výdeje vodíku je uvažován jako „bezkompresorový“, tzn. výdej bude závislý na zbytkovém tlaku vodíku v lahvích zásobníku. Z tohoto důvodu byl systém optimalizován na tři – či čtyř sekční rozdělení tlakových lahví. Bylo nutné určit zejména rychlost přepouštění vodíku (přímo ovlivňuje dobu plnění, ale komplikuje provedení systému) a dále provozní teploty vodíku, provozní prostředí a plnění tlakových lahví zásobníku. Optimální parametry přepouštění byly stanoveny s využitím vyvinutého unikátního vlastního softwaru vytvořeného v počítačovém systému MATLAB.

Ovládání jednotlivých sekcí vodíkové stanice, stejně jako komunikaci s uživatelem a bezpečnostním systémem, bude zajišťovat řídicí systém. Řídicí systém bude, společně s bezpečnostním systémem, napájen z vlastní baterie, nabíjené vnějším zdrojem, solárními

panely nebo palivovým článkem. Bezpečnostní systém bude monitorovat a uvolňovat funkci jednotlivých bloků, bude detekovat únik vodíku, nečekaný pokles tlaku atd.

Po dokončení výroby reálného zařízení bude nutné provést jeho funkční a bezpečnostní testy.

Vybrané technické a technologické aspekty mobilní vodíkové plnicí stanice (použité technologie, materiálové a energetické toky)

Tlakové zásobníky:

- byly voleny s ohledem na maximalizaci uloženého vodíku do hmotnosti systému menšího než 3,5 t, resp. dle cílové celkové hmotnosti jízdní soupravy,
- jedná se o kompozitní lahve typ 3 nebo 4,
- nutností je certifikace pro přepravu tlakového vodíku – např. TPED (Transportable Pressure Equipment Directive).

Přívěs pro integraci vodíkového systému:

- musí být připraven pro provoz na pozemních komunikacích,
- musí splňovat parametry celkové povolené hmotnosti a možnosti rozložení hmotnosti,
- musí splňovat rozměry pro umístění systému,
- musí splňovat pevnostní a životnostní podmínky a podmínky minimalizace vibrací přenášených na tlakový zásobník.

Vysokotlakové rozvody a komponenty:

- zajišťují rozvod tlakového vodíku,
- zajišťují bezpečnostní akce (přetlakový ventil, filtry atd.),
- obsahuje filtry a komponenty pro řízení průtoku vodíku.

Řídicí systém:

- monitoruje senzory a provozní veličiny,
- komunikuje s nadřazeným systémem a vzdálenou správou,
- zajišťuje nastavení, diagnostiku a interakci s uživatelem,
- zahrnuje algoritmus, který zajišťuje optimální plnění.

Bezpečnostní systém:

- monitoruje prostředí a v případě potřeby zajišťuje technickou eskalaci bezpečnostních opatření,
- systém musí být složen ze spolehlivých a certifikovaných komponent,
- struktura a funkce systému vychází z analýzy prostředí a způsobu realizace opatření pro minimalizaci možností vzniku nebezpečných situací,
- v případě potřeby musí zabezpečit okamžité odpojení zásoby vodíku.

Systém plnění vodíku:

- plnění vodíku je koncipováno pro plnění na veřejných plnicích s hladinami 350 a 700 bar,
- komponenty systému plnění musí zajistit vhodný průtok vodíku, aby při plnění nedošlo k přehřátí tlakových lahví.

Systém výdeje vodíku:

- výdej musí technicky splňovat potřeby pro plnění systémů provozním tlakem 350 a 700 bar.

Závěr

V příspěvku je uveden postup výzkumu a vývoje mobilní plnicí vodíkové stanice a její technické a provozní parametry. Tento prototyp je vyvíjen 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.

Byly již provedeny potřebné úkony pro následnou certifikaci mobilní plnicí vodíkové stanice a povolení jejího převozu po dopravních komunikacích. Byly vytipovány a pořízeny potřebné komponenty a byla navržena optimalizace tlakových sekcí. Aktuálně je vyvíjen řídicí systém plnění vozidel, který zohledňuje složitost jejich plnění vodíkem z ambientní teploty.

Poděkování

Prototyp mobilní vodíkové plnicí stanice je vyvíjen s podporou projektu Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0025011 APLIKACE – VÝZVA VIII „Mobilní vodíková plnicí stanice“, jehož řešení by mělo být dokončeno v roce 2023.

Literatura

- [1] *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility* [online]. MPO ČR, 2020 [cit. 2022-09-13]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>
- [2] *V Česku vyrostou první tři veřejné vodíkové čerpací stanice* [online]. Hybrid.cz, 2020 [cit. 2022-09-13] ISSN 1802-5323. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/v-cesku-vyrostou-prvni-tri-verejne-vodikove-cerpaci-stance/>
- [3] Příhláška projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0025011 *Mobilní vodíková plnicí stanice* do programu MPO ČR „Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost, APLIKACE – VÝZVA VII“. Mnichovo Hradiště, DEVINN s.r.o., 2021.
- [4] WILL, James. *An Introduction to SAE Hydrogen Fueling Standardization*. U.S. Department of Energy [online]. 2014 [cit. 2022-09-13]. Available on: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/fcto_webinarslides_intro_sae_h2_fueling_standardization_091114.pdf

3D TISK A VR VE ŠKODA JS A.S.

3D PRINTING AND VR IN ŠKODA JS A.S.

Antonín Rudolf

ŠKODA JS a.s., Orlík 266, Plzeň

Abstrakt – 3D tisk a VR ve Škoda JS a.s.

V posledních letech se společnost ŠKODA JS a.s. snaží držet aktuálních trendů v průmyslu a začala se tak intenzivně věnovat virtuální realitě, augmentované realitě (VR, AR) a 3D tisku. První snahy o využití těchto technologií začaly již v roce 2012, kdy byl na objednávku proveden první 3D tisk. Mezitím došlo k tak významnému progresu, že nyní ŠKODA JS disponuje tiskárnami na pracovištích v Plzni a na lokalitách JE Temelín, Dukovany a Mochovce a dodává 3D tisky na tyto elektrárny.

V oblasti VR a AR je možné ŠKODA JS a.s. považovat za průkopníka. Jako první jsme byli schopni použít VR pro komerční účely v JE v ČR. V současnosti je ve ŠKODA JS a.s. VR a AR používána již jako standardní nástroj. Máme pro VR plně vybavenou místnost, kde mimo jiné provádíme školení. K dispozici jsou nejrůznější zařízení, například tablety a brýle pro VR a AR.

Abstract – 3D printing and VR in Škoda JS a.s.

In recent years, ŠKODA JS a.s. has been trying to keep up with current industry trends and has started to focus intensively on virtual reality, augmented reality (VR, AR) and 3D printing. The first efforts to use these technologies began already in 2012, when the first 3D printing was made to order. In the meantime, there has been such significant progress that ŠKODA JS now has printers at workplaces in Pilsen and at the Temelín, Dukovany and Mochovce NPP locations and supplies 3D prints to these power plants.

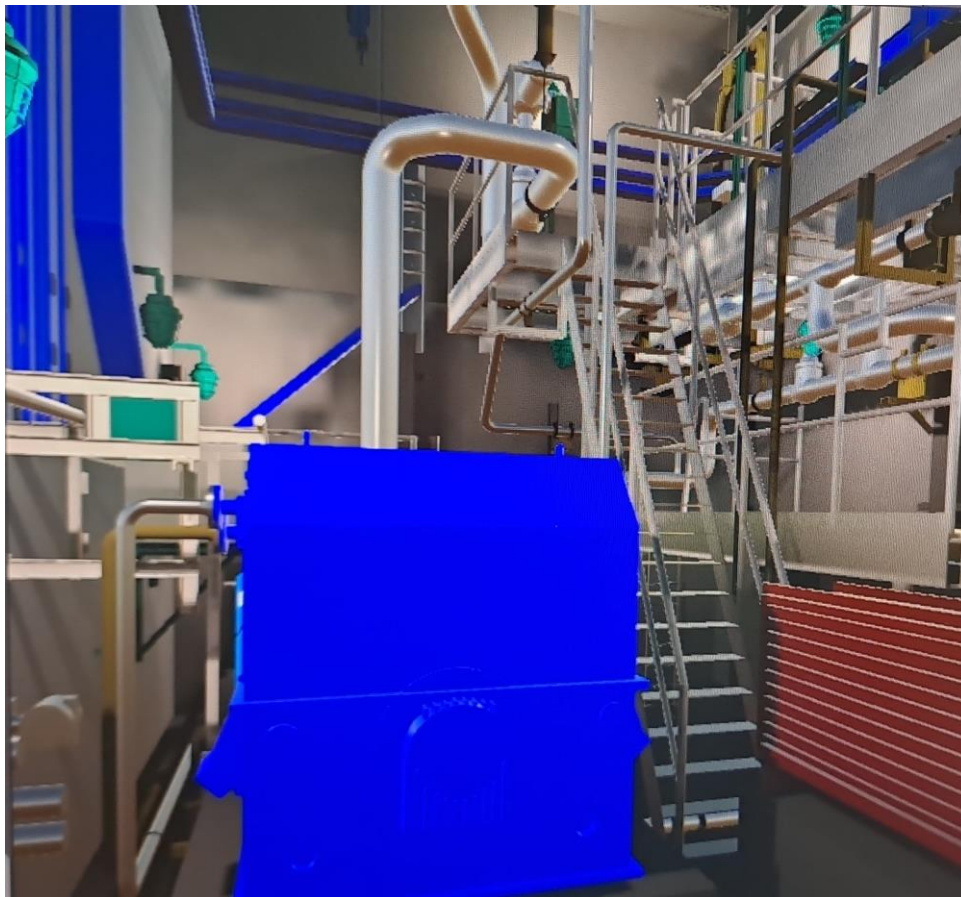
ŠKODA JS a.s. can be considered a pioneer in the field of VR and AR. We were the first to be able to use VR for commercial purposes at a NPP in the Czech Republic. VR and AR are already used as a standard tool in ŠKODA JS a.s. We have a fully equipped room for virtual reality, where among other things we conduct trainings. Various devices, such as tablets and HMD for VR and AR, are available.

3D tisk

ŠKODA JS a.s. využívá 3D tisk jak na výrobu přípravků a prototypů, tak i finálních výrobků. 3D tisk je v současnosti ve ŠKODA JS již vnímán jako standardní výrobní proces. 3D tištěné díly jsou například součástí dodávky obalového souboru ŠKODA 1000/19 na JE Temelín ve formě přípravků. Zabýváme se nejen tiskem pokročilých plastů, ale i kovových materiálů. Jako výrobce komponent, poskytující servisní činnost, disponující materiálovými laboratořemi a znalý legislativních požadavků, máme unikátní know-how pro výrobu komponent 3D tiskem. Spolupracujeme s výrobcí 3D tiskáren i vývojáři nových technologií a pracujeme na tom, aby 3D tisk splnil náročné požadavky v jaderném průmyslu.

VR

V současnosti je ve ŠKODA JS a.s. VR a AR používána již jako standardní softwarový nástroj. Máme pro VR plně vybavenou místnost, kde mimo jiné provádíme školení. K dispozici jsou nejrůznější zařízení, například tablety a brýle pro VR a AR. VR a AR využíváme ve všech našich oblastech, kterými jsou inženýring, výroba a servis. VR používáme pro ověřování designu, pro komunikaci mezi jednotlivými složkami, pro ověření návrhu, prezentace zákazníkům, také pro školení, například pro SÚJB, kde standardní školení bylo doplněno školením ve VR.



Obr. 2: Transport motorů TQ, TX na JE Temelín

ŠKODA JS a.s. patří mezi několik málo společností, jež VR a AR nejenom vytváří, ale i používají.

ANALÝZA VAD POŠKOZENÉ LOPATKY NT DÍLU TURBOGENERÁTORU JE

DEFECT ANALYSIS OF THE NPP TURBOGENERATOR BLADE

Miroslav Krpec, Jaroslav Burda, Miroslava Ernestová, Zuzana Vávrovcová a Petr Brabec

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Při pravidelné kontrole provedené magnetickou práškovou metodou byly na povrchu v oblasti listu náběžné hrany lopatky NT rotoru turbogenerátoru nalezeny čtyři lineární indikace. Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto o převezení lopatky do akreditovaných laboratoří ÚJV Řež, a. s., kde byly indikace podrobeny detailnímu destruktivnímu hodnocení. Cílem hodnocení bylo objasnění příčin vzniku indikací na poškozené lopatce a doporučení pro další provoz.

Abstract

During the periodic inspection, four linear indications were found on the surface of the turbogenerator rotor blade in the region of the leading edge using the magnetic powder NDT method. Based on these results, a transfer of the blade to the accredited laboratories of ÚJV Řež, a. s. was decided. The indications were subjected to a detailed destructive evaluation. The evaluation aimed to clarify the cause of the defect detected on the blade and provide recommendations for further operation.

Úvod

V oblasti náběžné hrany lopatky (Obr. 1) byly na JE při periodické kontrole magnetickou práškovou metodou identifikovány celkem čtyři lineární indikace, jejichž pozice se nachází 4-5 mm od náběžné hrany na straně žlábků profilu. Indikace byly zjištěny ve vzdálenosti 460 až 530 mm od paty profilu (při délce lopatky 940 mm odpovídá vzdálenosti 310 až 380 mm od horní hrany listu). Výsledky hodnocení byly shrnuty v rámci technické zprávy [1].



Obr. 1: Poškozená lopatka NT dílu turbogenerátoru JE s vyznačenou oblastí výskytu indikací.

Materiál a použitá metodika

Deklarovaný materiál lopatky je X12CrNiMo. Jedná se o martenzitickou ocel legovanou cca 1,5 až 2,0 % Mo. List oběžné lopatky byl vyjmut z nízkotlaké (NT) části turbogenerátoru (TG) a pracoval při parametrech viz Tab. 1 po dobu cca 80 896 provozních hodin.

Tab. 1: Základní informace poškozené lopatky.

List oběžné lopatky NT stupně stroje TG				
Materiál	Proudící médium	Provozní teplota (vstup/výstup)	Provozní tlak (vstup/výstup)	Váha
X12CrNiMo	vlhká pára	216 °C /148 °C	0,45 MPa/0,4 kPa	42,4 kg
Průtok (vstup/výstup)	Délka provozu	Rozměry		
2x435 t/hod / 375 t/hod	80 896 provozních hodin	délka = 940 mm		
		šířka volný konec = 230 mm		
		šířka zámek = 310 mm		

Pro zjištění stavu poškozené lopatky bylo provedeno v akreditovaných laboratořích zhotovitele destruktivní hodnocení.

Destruktivní hodnocení

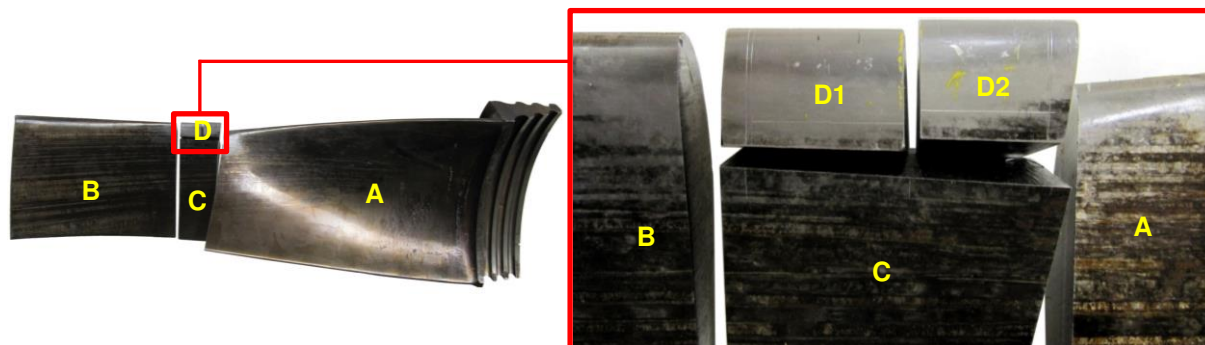
Destruktivní hodnocení sestávalo z ověření a dokumentace indikací, fraktografie lomových ploch trhlina metalografických analýz.

- *Hodnocení makro a mikrostruktury v příčných řezech.* Vzorky byly připraveny standardním způsobem, tj. mechanickým broušením na metalografických papírech o zrnitosti 320–2400, mechanickým leštěním diamantovými pastami o zrnitosti 3 a 1 μm a mechanicko-chemickým leštěním na koloidní silice (OPS Struers). Struktura materiálu byla vyvolána chemicky leptáním. Obrazová dokumentace byla zpracována na světelném mikroskopu (LOM) Epiphot 300.
- *Stanovení mikrotvrdosti materiálu* v oblasti indikací bylo provedeno pomocí mikrotvrdoměru MHT Anton Paar v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1. Podmínky zatěžování byly 100 g po dobu 10 s.
- *SEM + EDS hodnocení indikací a mikroanalýza úsad* byla pořízena v sekundárních (SE) a zpětně odražených elektronech (BSE) na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) VEGA TS 5130 XM (fy. Tescan). Semikvantitativní analýzy byly provedeny na EDS analyzátoru INCA Energy 350 fy. Oxford Instruments, připojeném na SEM s řídicím softwarem Aztec, verze 3.1. Chemické odstranění korozních produktů bylo provedeno dle normy ČSN ISO 8407.

Výsledky

Rozřez v oblasti s indikacemi

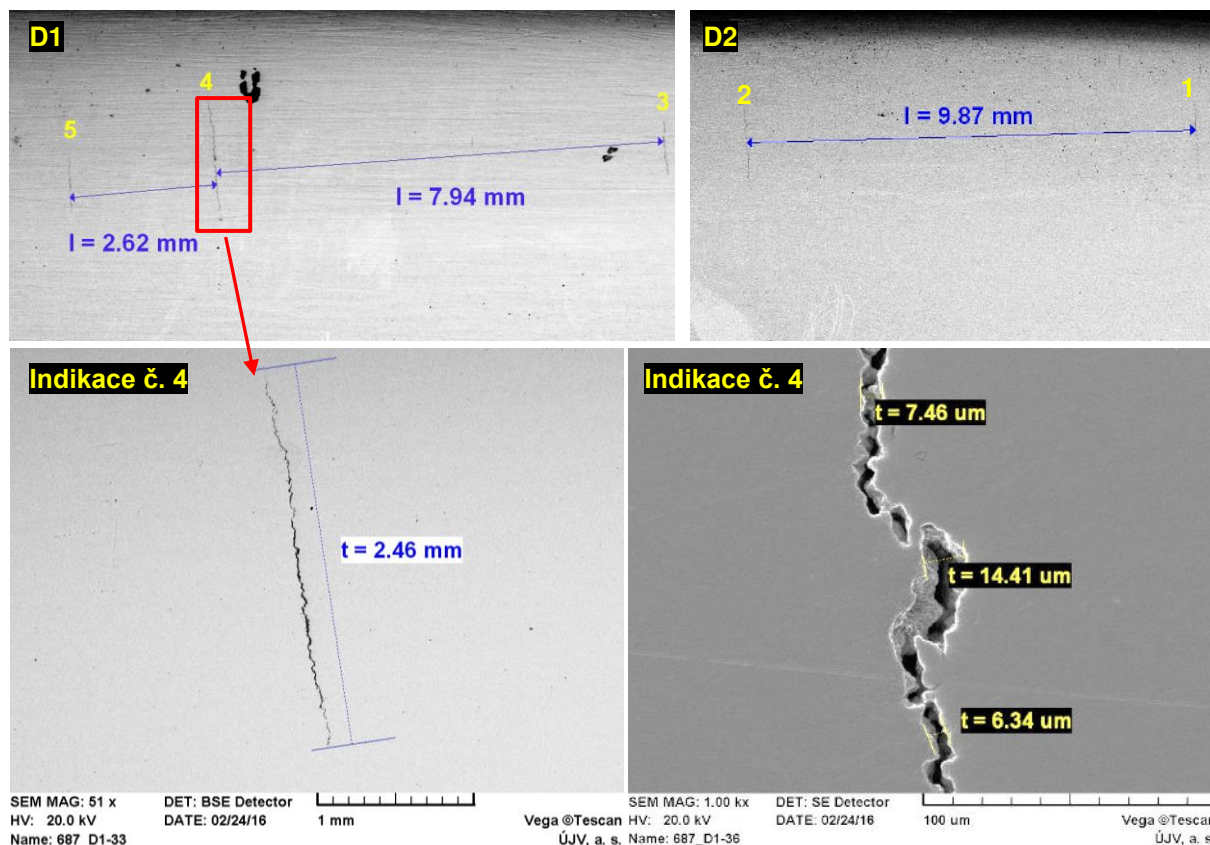
Pro detailní hodnocení poškození byla rotorová lopatka rozřezána rámovou pilou na jednotlivé segmenty A, B, C, D (Obr. 2). Oblast poškození je vyznačena červeným rámečkem. Segment D byl z důvodu manipulace a přípravy vzorků pro SEM a LOM mezi indikacemi 2 a 3 rozřezán na dvě části (D1 a D2). Povrchy segmentů byly následně zkoumány a dokumentovány na elektronovém mikroskopu.



Obr. 2: Rozřezový plán rotorové lopatky.

Dokumentace indikací na povrchu lopatky

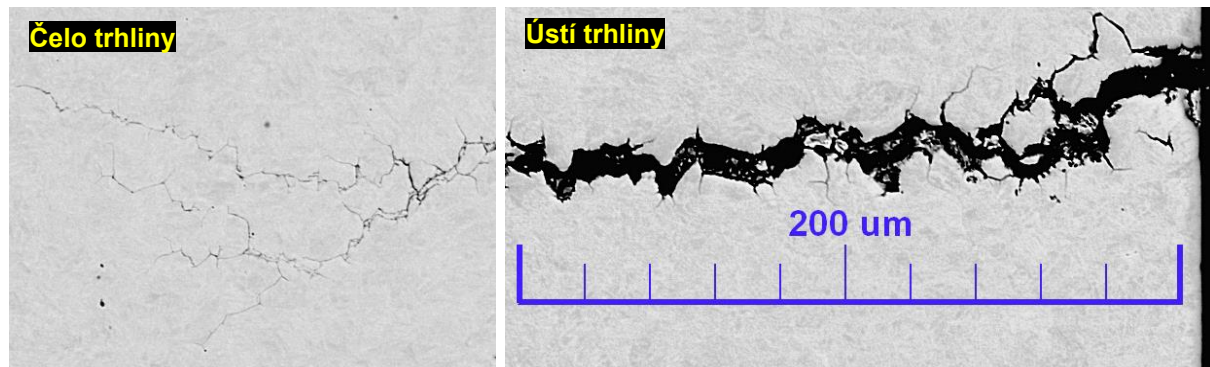
Na segmentu D1 byly elektronovým mikroskopem identifikovány tři lineární indikace rozdílných délek. Na segmentu D2 se vyskytovaly lineární indikace dvě. Označení indikací a jejich pozice vzhledem k náběžné hraně lopatky jsou zdokumentovány na Obr. 3. Studium v SEM bylo ověřeno, že se jedná o trhliny. Trhliny se vyskytovaly ve vzdálenosti cca 2,5 mm od náběžné hrany a šířily se od náběžné hrany pod úhlem cca 80 až 85°. Detailní hodnocení bylo následně zaměřeno na magistrální trhlinu č. 4. Poté byl připraven metalografický výbrus.



Obr. 3: Vnitřní povrchy segmentů D1 a D2 a charakter magistrální trhliny č. 4.

Příčný řez magistrální trhlinou

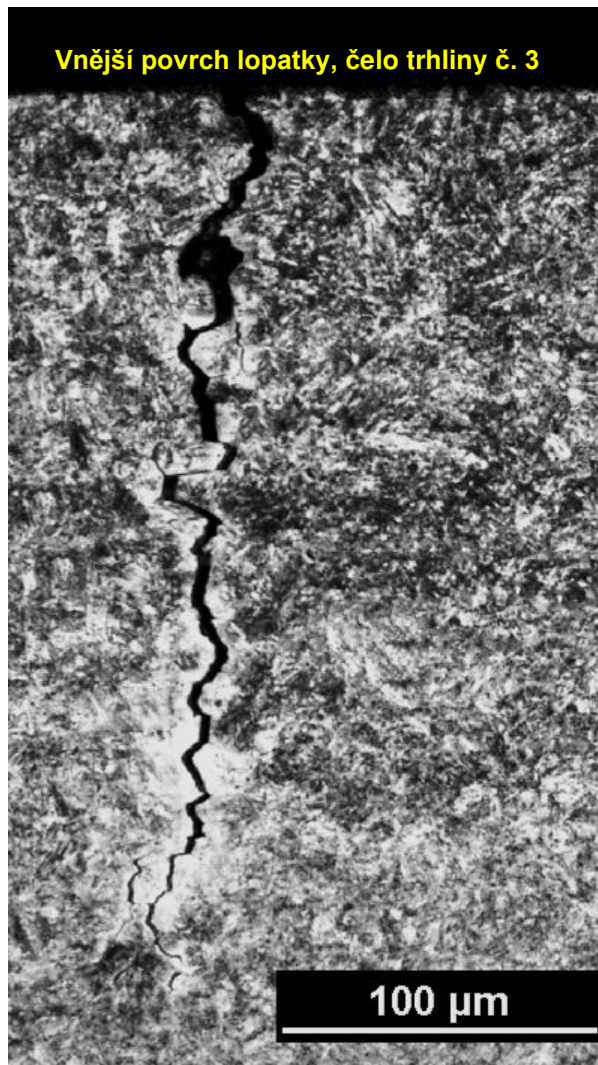
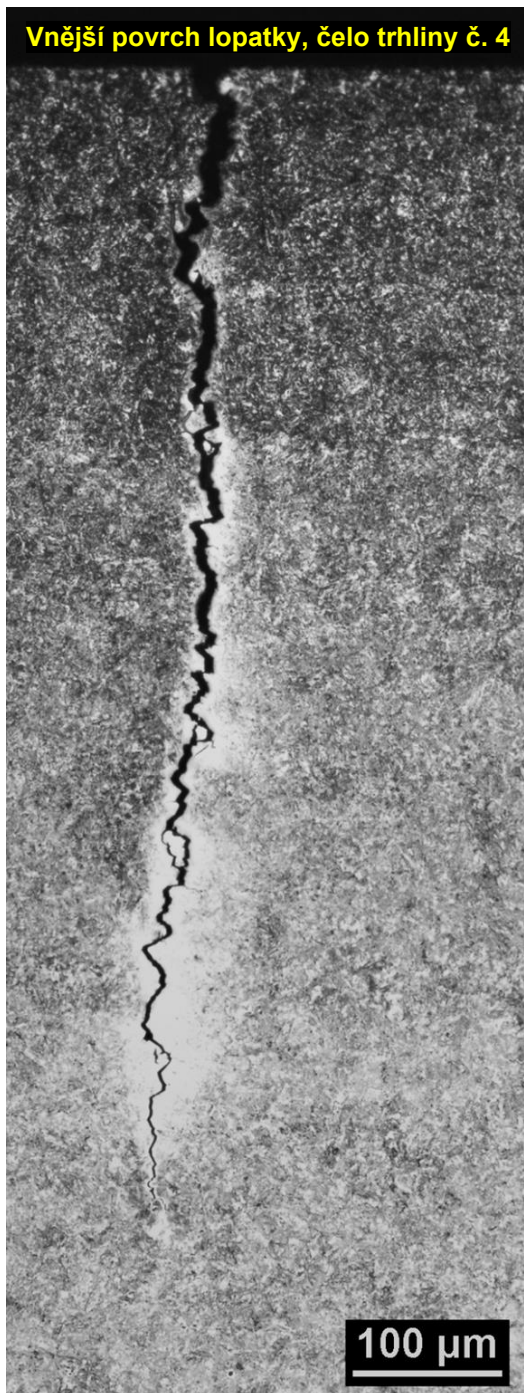
Magistrální trhlina byla rozdělena příčným řezem cca v polovině své délky. Hloubka trhliny a její charakter větvení je viditelný na Obr. 4. Z pořízené fotodokumentace v řezu je patrné v těsném okolí trhliny větvení, především pak v oblasti čela trhliny. Větvení a interkrystalický průběh (průběh po hranicích zrn) je charakteristický pro poškození korozním praskáním pod napětím (SCC), ke kterému dochází při působení tahového napětí ve specifickém prostředí.



Obr. 4: Charakter magistrální trhliny č. 4 v řezu + větvení trhliny.

Dokumentace mikrostruktury materiálu lopatky

Mikrostruktura materiálu byla dokumentována v blízkosti trhlin č. 3 a č. 4. Mikrostruktura materiálu je martenzitická (Obr. 5) a odpovídá deklarované mikrostruktuře materiálu lopatky X12CrNiMo. Po leptání se v blízkosti trhlin (v okolí $\pm 60 \mu\text{m}$) zejména u jejich čela vyskytovaly světlé oblasti, které ukazují na snížený obsah karbidů (v důsledku koroze).

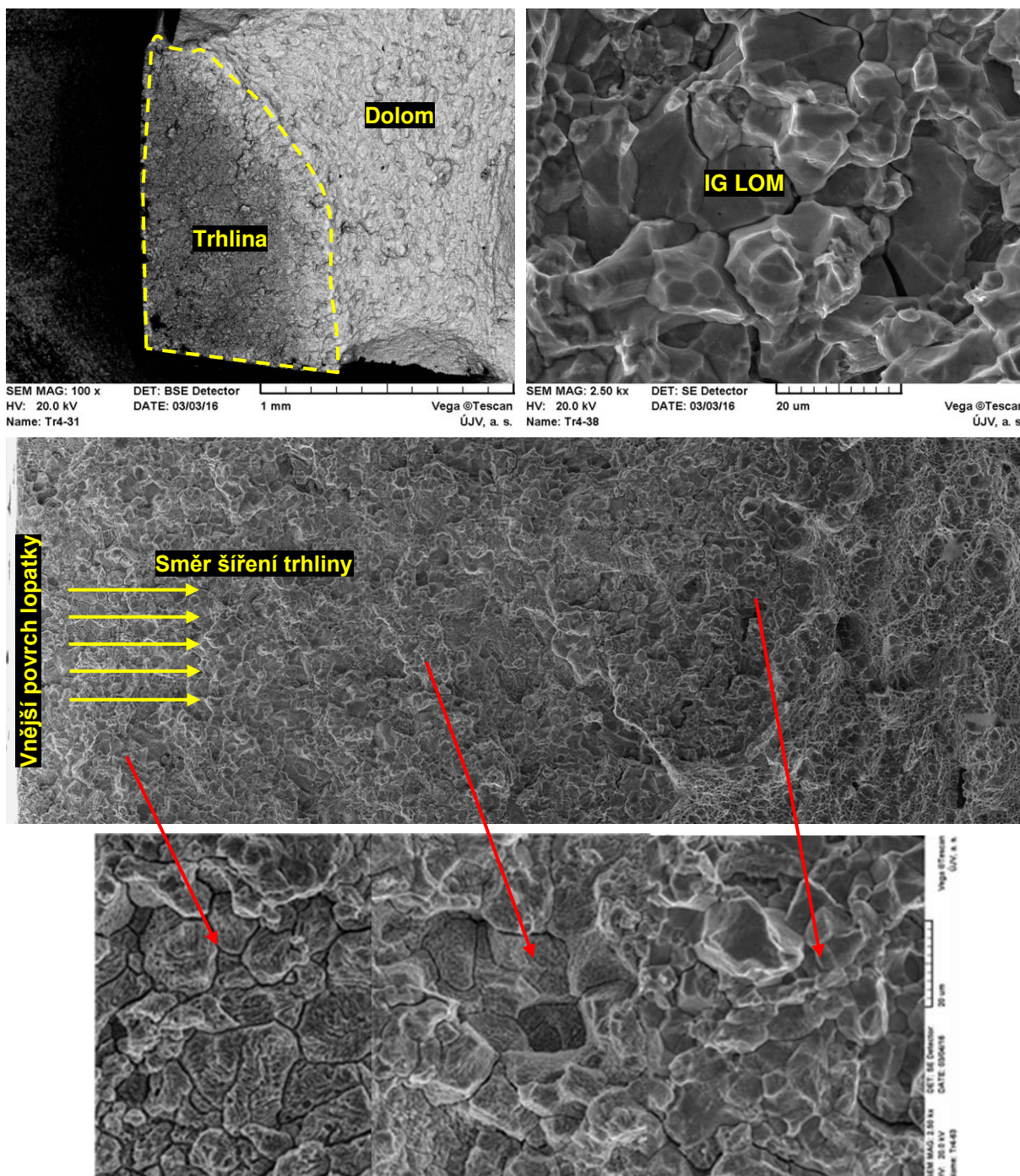


Světlé oblasti okolo trhliny, zejména u čela, ukazují na snížený obsah karbidů (potvrzeno poklesem mikrotvrdosti při měření profilu MHV přes tuto oblast trhliny).

Obr. 5: Dokumentace mikrostruktury materiálu lopatky v oblasti trhlin č. 3 a 4.

Dokumentace dolomené části lopatky s trhlinou

Po provedení analýz v oblasti magistralní trhliny č. 4 byla trhlina ze segmentu D1 vyřezána a následně rozlomena pro studium lomové plochy. Morfologie plochy rozlomené trhliny byla studována na elektronovém mikroskopu. Vzhled trhliny po rozlomení je uveden na Obr. 6. Morfologie lomové plochy trhliny byla v celém průřezu tvořena interkrystalickým křehkým lomem. Trhlina se šířila z vnějšího povrchu směrem do materiálu tělesa lopatky a její hloubka byla cca 0,80 mm. Oxidické úsady, které se na lomové ploše vyskytovaly, měly proměnnou tloušťku. Z oblasti ústí trhliny (z oblasti vnějšího povrchu) tloušťka oxidických úsad směrem k čelu trhliny klesala.



Obr. 6: Dokumentace morfologie v oblasti ústí trhliny, střední části a čela trhliny.

Závěr

Analyzované trhliny jsou interkrystalické, vzniklé v důsledku korozního praskání pod napětím (SCC). Při korozním praskání pod napětím vznikají a rostou v materiálu trhliny vlivem statického tahového napětí při součinnosti specifického korozního prostředí. Morfologii lomové plochy trhliny tvoří převážně interkrystalický lom, který se šíří převážně po hranicích zrn.

Mechanismus SCC se vysvětluje aktivním rozpouštěním na čele trhliny, která zároveň působí jako koncentrátor napětí. Pro vznik SCC není vždy nutné vnější mechanické namáhání, ale stačí jen přítomnost vnitřního napětí v materiálu. K iniciaci korozní trhliny dochází v místech porušení pasivační vrstvy tahovým napětím, místem jejího vzniku může být lokalizovaná koroze na povrchu.

Na základě destruktivního hodnocení dodané lopatky NT dílu, lze konstatovat následující:

- V oblasti náběžné hrany lopatky bylo identifikováno celkem pět lineárních trhlín, jejichž délky se pohybovaly od 1,1 mm do cca 2,5 mm.
- Hloubka magistralní trhliny byla cca 0,8 mm.
Morfologie lomové plochy trhliny č. 4 byla tvořena interkrystalickým křehkým lomem.
- Trhliny vyskytující se v oblasti náběžné hrany lopatky vznikly mechanismem korozního praskání pod napětím.

Literatura

- [1] KRPEC, Miroslav, BURDA, Jaroslav, ERNESTOVÁ, Miroslava a SKOUMALOVÁ, Zuzana, *Analýza vad poškozené lopatky NT dílu TG stroje*. 2015, ÚJV Řež, a. s.

STEND INSPEKČÍ PALIVOVÝCH SOUBORŮ

FUEL ASSEMBLY INSPECTION STAND

Miloslav Ruchař ^{a)} a Marko Štípek ^{b)}

^{a)} ŠKODA JS a.s., Divize D3 Jaderné zařízení, odbor Konstrukce

^{b)} ČEZ a.s., Jaderná elektrárna Temelín, DJE – inženýring změn projektu

Abstrakt

Příspěvek navazuje na loňské představení nového zařízení ŠKODA JS a.s., které je určeno k provádění provozních kontrol ozářených palivových souborů na jaderné elektrárně Temelín v České republice. V příspěvku jsou prezentovány praktické zkušenosti s přípravou zařízení, jeho transporty a montáží před prováděním kontrol i operace spojené s jeho dekontaminací a zpětným transportem k uložení ve skladovacích prostorech. Nároky na tyto činnosti jsou porovnány s předchozí generací zařízení, které bylo na elektrárně Temelín používáno od jejího uvedení do provozu. Je uvedeno srovnání těchto operací i vyhodnocení přínosů z pohledu bezpečnosti, nároků na obsluhu, transportních manipulací a přípravných kontrol na provádění inspekci. Současně je vyhodnocen hlavní přínos nového zařízení, a to možnost provádění kontrol palivových souborů paralelně s jinými operacemi s palivovými soubory pomocí zavážecího stroje, což u předchozí generace zařízení nebylo možné.

Abstract

The paper follows up on last year's presentation of the new ŠKODA JS a.s. equipment, which is designed to carry out operational inspections of irradiated fuel assemblies at the Temelín NPP in the Czech Republic. The paper presents practical experience with the preparation of equipment, its transport and installation before inspections, as well as operations associated with its decontamination and return transport for storage in storage areas. The demands for these activities are compared with the previous generation of equipment that has been used at the Temelín NPP since its commissioning. It compares these operations as well as evaluates the benefits in terms of safety, operator requirements, transport handling, and preparatory controls before fuel inspections. At the same time, the main advantage of the new equipment is evaluated, namely the possibility of performing inspections of fuel assemblies in parallel with other operations with fuel assemblies using a refuelling machine, which was not possible with the previous generation of the inspection equipment.

Úvod

V předchozím ročníku konference byl prvně představen Stend inspekce palivových souborů (dále jen SI-PS), který reprezentuje nové inovativní řešení pro provádění provozních kontrol ozářených palivových souborů (dále jen PS) všech typů provozovaných na JE Temelín. Stend byl vyvinut ve spolupráci techniků ŠKODA JS a.s. a ČEZ a.s. Jeho první provozní nasazení a vyzkoušení proběhlo během odstávek obou bloků elektrárny v roce 2021, v letošních odstávkách byl nasazen podruhé v řadě na každém bloku.

Nový stend inspekci tak plně nahradil dříve používané zařízení MSIO, mobilní stend inspekci a oprav, které bylo na JE Temelín používáno od doby provozního spuštění obou bloků. Z výsledků provedených kontrol PS i z praktických zkušeností z transportů, montáže, provozu, dekontaminace i následné demontáže SI-PS lze porovnat, jak nový stend naplnil stanovené cíle pro jeho používání na JE Temelín, a to je i hlavním záměrem uvedeného příspěvku.

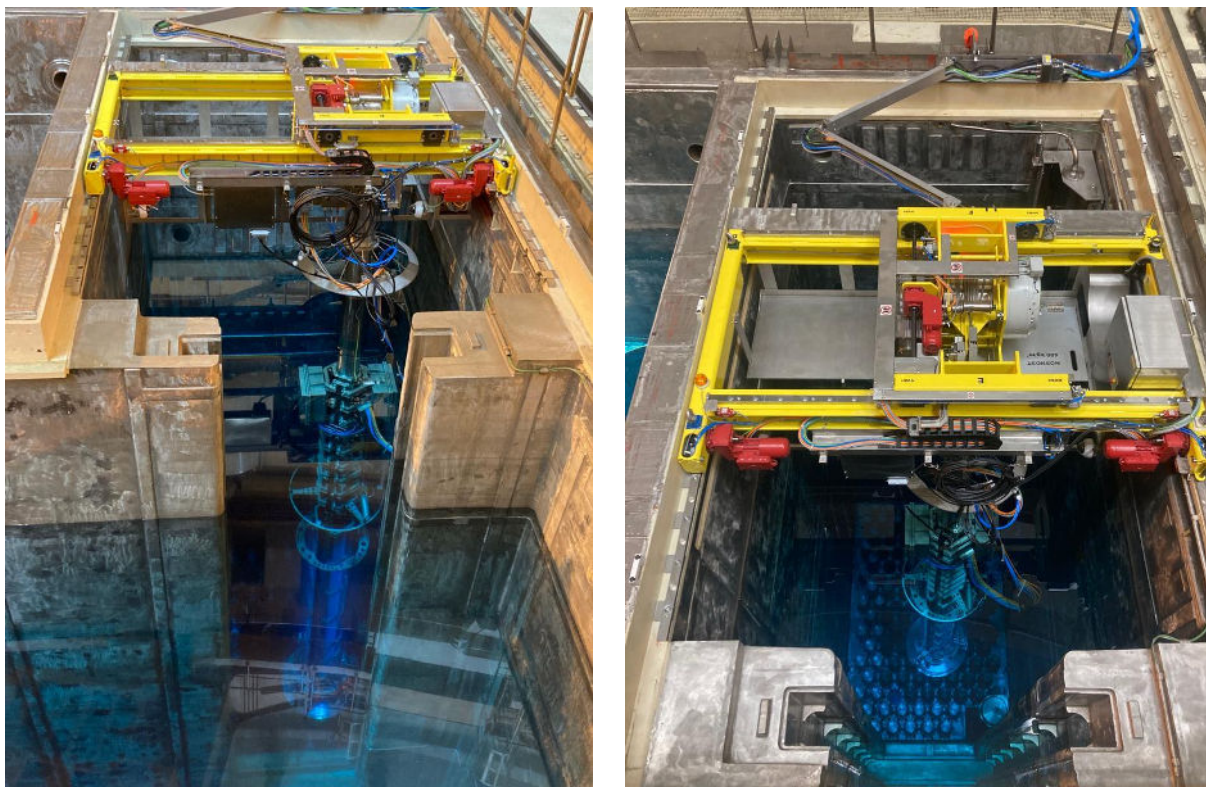
Funkce, účel a hlavní technické parametry

Stend SI-PS je navržen pro provádění inspekcí všech typů dosud provozovaných PS na JE Temelín, tedy PS od dodavatelů TVEL i Westinghouse. Aktuální provedení stendu umožňuje provádět následující rozsah inspekcí:

- Vizuální prohlídka viditelného vnějšího povrchu PS pomocí hi-rad odolných kamer:
 - Rozlišení do 600 TV řádek
 - Optický zoom až 5x
 - Radiační odolnost špičkově do 10^4 Gy/hod, integrálně do 2×10^6 Gy
- Měření geometrie PS v zavěšeném stavu v rozsahu:
 - Měření průhybu PS, včetně vyhodnocení vektoru a maximální hodnoty po délce PS, přesnost $\pm 0,5$ mm
 - Měření zkřutu PS, včetně vyhodnocení maxima na distančních mřížkách po délce PS, přesnost $\pm 0,5^\circ$
 - Měření délky PS v zavěšeném stavu, přesnost $\pm 0,5$ mm
- Měření rozložení teplot v blízkosti PS po jeho délce

Konstrukční řešení stendu je již od začátku uvažováno modulárně tak, aby jeho jednotlivé konstrukční části mohli být v budoucnu doplňovány dalšími komponentami pro možnost budoucího rozšiřování prováděných inspekcí. Hlavní části stendu tvoří most, inspekční sloup a ovládací pult, společně s příslušenstvím pro kalibraci, transport a skladování.

Součástí řešení je i integrovaný antikolizní systém, který umožňuje zajištění zavážecího stroje (ZS) do prostoru bazénu s palivem při zajištěné parkovací poloze SI-PS. Díky tomuto řešení je umožněna průběžná výměna PS v bazénu a počet kontrolovaných PS tak není omezen konstrukcí dílů, ale pouze určeným časovým prostorem na inspekce PS během odstávky.

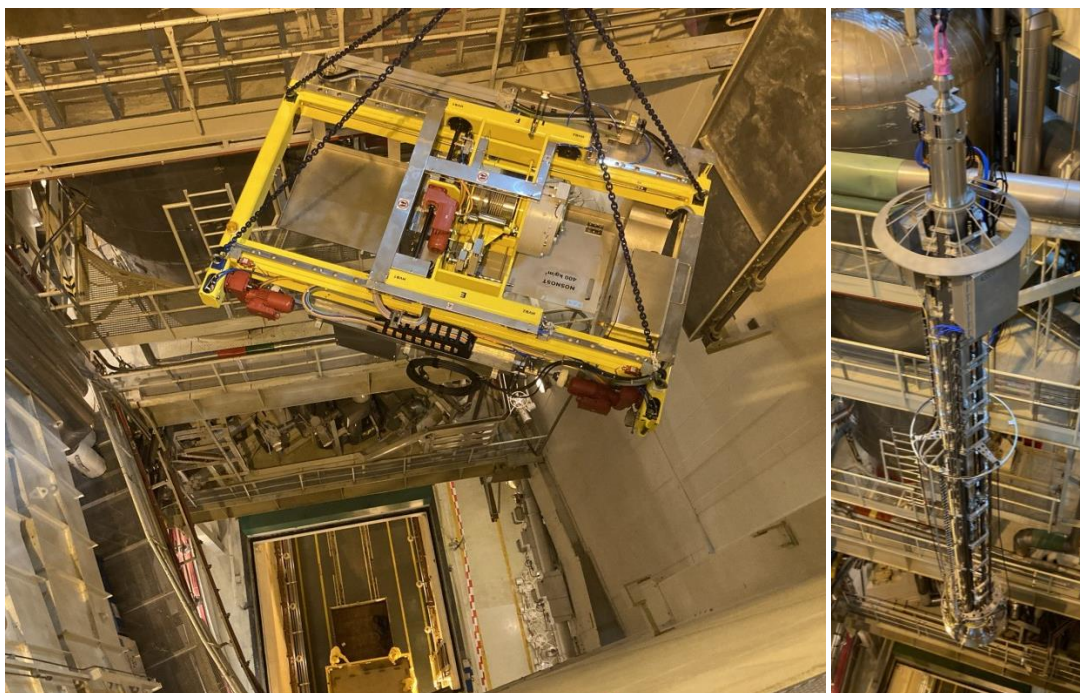


Obr. 1. SI-PS nad bazénem inspekce PS

Montáž stendu a přípravy před inspekcí PS

Montáž stendu je navržena s důrazem na minimalizaci manipulací pomocí polárního jeřábu, minimalizaci montážních operací prováděných na reaktorovém sále a snížení potřeby skladovacích ploch v tomto místě na minimum. Tato koncepce oproti předchozímu zařízení MSIO zajišťuje hned několik benefitů naráz, jednak zásadní zkrácení kritických časů odstávek, tak i výrazné snížení kolektivních dávek obsluhy, a v neposlední řadě i vyšší bezpečnost práce.

Během montáže není potřeba vyhrazovat zvláštní místo na podlaze reaktorového sálu (RS), most se přímo z transportního koridoru umístí nad pracovní prostor s bazénem uložení PS. Následně se do určeného prostoru na podlaze RS umístí ovládací pult a propojí se kabeláž mezi pultem a mostem. Do takto připravené sestavy se z transportního koridoru zaveze inspekční sloup a tím je montáž jednotlivých dílů stendu dokončena.



Obr. 2. Vlevo transport mostu, vpravo transport inspekčního sloupu koridorem



Obr. 3. Vlevo montáž mostu na koleje, vpravo montáž sloupu do mostu SI-PS

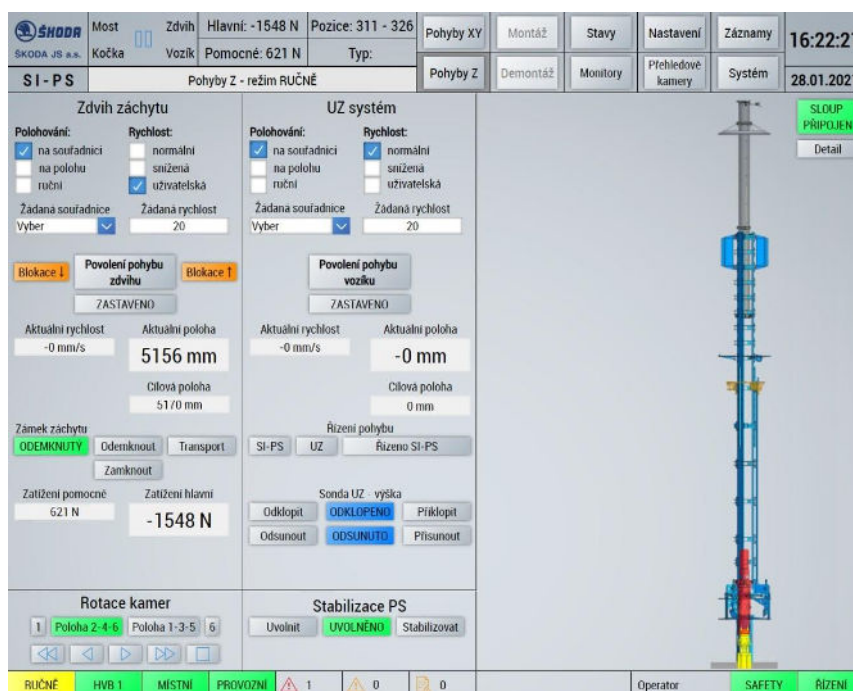
Po montáži se prověří všechny funkce systému a provede se kalibrace měřícího systému geometrie PS a stend je připraven k inspekcím prvních PS.

Podobným způsobem, jako probíhá montáž, je prováděna i demontáž částí stendu s jedním rozdílem, že inspekční sloup se před odvozem z reaktorového sálu ještě dekontaminuje oplachem vody v určené šachtě vedle bazénu inspekcí.

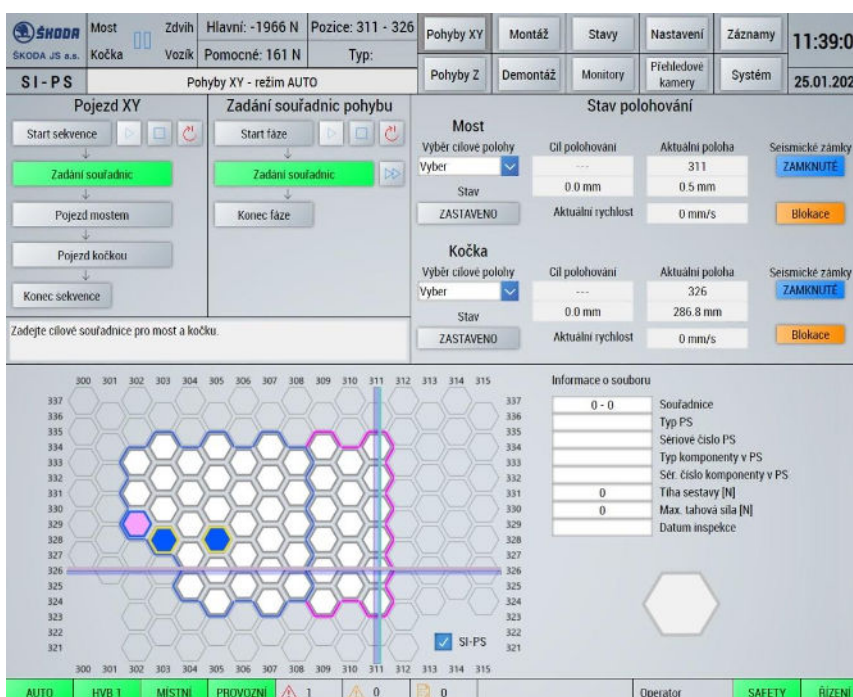
Postup inspekci PS

Vlastní inspekce jednotlivých PS pomocí SI-PS probíhají v pořadí určeném dle požadavků provozovatele, přičemž se využívají data ze ZS o pozicích jednotlivých typů PS v mříži v bazénu v B02. SI-PS tak sdílí se ZS společný kartogram závazky bazénu PS.

Typová inspekce jednoho PS probíhá v poloautomatickém režimu ovládání, kdy operátor prochází zadaným scénářem postupu inspekci a potvrzuje provedení každého z dílčích kroků. Samozřejmostí je možnost přerušení poloautomatického režimu, nebo provedení následných detailních kontrol v případě potřeby. Průvodcem operátora je uživatelsky příjemný vizualizační systém, který znázorňuje veškeré stavy zařízení i aktuální hodnoty parametrů.



Obr. 4. Pohled na vizualizaci ovládání SI-PS – inspekce PS



Obr. 5. Pohled na vizualizaci ovládání SI-PS – polohování mostu

Data z provedených kontrol se ukládají do systému SI-PS s vazbou na značení kontrolovaných PS. Po ukončení inspekce se data exportují k finálnímu zpracování a vyhodnocení výsledků kontrol jednotlivých PS.

Souhrn provozních zkušeností z inspekce PS v letech 2021 a 2022

Jak již bylo uvedeno v úvodu příspěvku, SI-PS během svých provozních nasazení úspěšně prokázal splnění všech cílů, které si stanovil jeho provozovatel, JE Temelín. A jak byly vlastně tyto cíle definovány a jak bylo vyhodnoceno jejich naplnění?

CÍL č.1: Zkrácení manipulací se stendem.

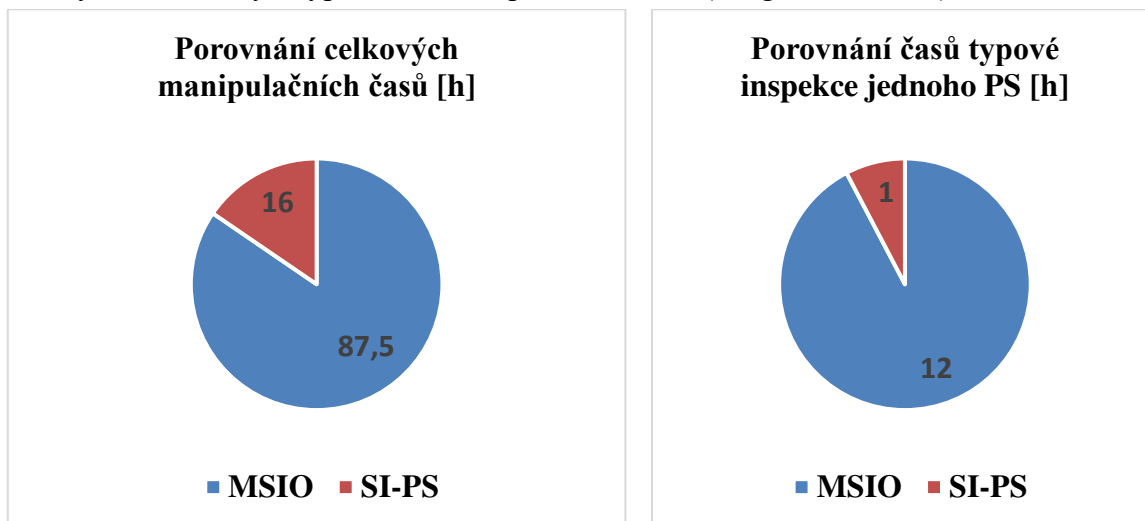
Ukazatel: zkrácení kritického času odstávky o 30 h/blok v porovnání s MSIO.

Hodnocení: Splněno – manipulace byly zkráceny o 71,5 h. Časový průměr [h] manipulací (montáž/demontáž) pro: MSIO = 42,5/45 h (r. 2015-2019) a SI-PS (r. 2021–2022) = 6,5/9,5 h (viz graf na Obr. 6). Časy u zařízení SI-PS lze dále optimalizovat v dalších odstávkách.

CÍL č.2: Provedení inspekce pro všechny typy ozářeného JP.

Ukazatel: Lze provádět vizuální kontroly v rozsahu: kontrola PS, kontrola viditelných periferních PP. Lze provádět rozměrové kontroly v rozsahu: průhyb, zkrut, délka PS

Hodnocení: Splněno – všechny ukazatele jsou naplněny. Potvrzena reálná přesnost do 0,4 mm s odchylkou při opakování do 0,1 mm. Navíc časové nároky na inspekci jednoho PS byly díky SI-PS výrazně sníženy a typová kontrola probíhá do 1 h (viz graf na Obr. 6).



Obr. 6. Porovnání časů manipulací a časů inspekce – stendy SI-PS a MSIO

CÍL č.3: Rozšířená inspekce.

Ukazatel: Stend umožňuje: možnost dalšího modulárního rozšíření.

Hodnocení: Splněno – koncepce SI-PS umožňuje umístění dalších čidel na inspekční sloup (IS), respektive náhradu celého IS s rozšířenou funkcí bez dopadu do základního projektového řešení systému SI-PS a navazující technologie ETE.

Možnosti dalšího rozšíření funkcí SI-PS na základě požadavku ČEZ a.s. byly zpracovány ve formě úvodní studie, která hodnotí možnost dalšího rozšíření rozsahu vizuálních kontrol o povrch anti-debris filtru (ADF) a rozšíření měření geometrie PS i v opřené stavu.

Dále se připravuje rozšíření studie o dovybavení zařízením na vyjímání cizích předmětů z PS a provádění kontroly oxidační vrstvy palivových proutků.

CÍL č.4: Eliminace dopadů inspekčních činností.

Ukazatel: Omezení dopadu přípravy inspekčních činností do HMG odstávky bloku (max 12 h transportních činností). Možnost nezávislého provozu ZS v částech bazénů B01, B03, B04.

Hodnocení: Splněno – transportní manipulace SI-PS s nárokem na PMJ byly výrazně zkráceny a jejich vliv je zahrnut v grafech na Obr. 6. Současně jsou sníženy strojní časy ZS pro prvních 50 ks PS a další množiny (29 ks) vyměnitelných PS, kde platí zvýšená rychlost ZS v BSVP (90 mm/s) oproti rychlosti povolené do MSIO (≤ 10 mm/s).

Během odstávek obou bloků JE Temelín v letech 2021 a 2022 byly úspěšně vyzkoušeny a prověřeny veškeré funkce SI-PS, včetně souběžné činnosti se ZS. Během těchto zkoušek bylo zařízení důkladně prověřeno ve všech provozních stavech a limitech. Při prvním nasazení v roce 2021 byly zjištěny i některé technické problémy, které lze u takto sofistikovaného prototypového zařízení předpokládat. Za zmínku stojí přerušení automatického chodu zařízení při navádění záchyty PS na některé z hlavice PS pouze na HVB2, kdy bezpečnostní systém SI-PS vždy správně zareagoval a preventivně zastavil pohyb záchyty stendu při vyšším odlehčení lana, než je projektem stanoveno. Následně provedenou analýzou jak na 3D modelu dílů, tak na fyzické maketě hlavice PS a záchyty SI-PS, byla jako příčina tohoto chování určena hrana naváděcího pera hlavice PS, která se u některých typů PS při krajních tolerancích vzájemné polohy obou dílů nevhodně opírala do naváděcí plochy záchyty PS. Konstrukční úprava byla navržena tak, že se do záchyty PS instalovaly dodatečné naváděcí vložky, které zmiňovaný kontakt dílů svojí geometrií vyloučily a současně byl zvolen vhodnější materiál vložek pro lepší tribo-technické vlastnosti. Upravené řešení bylo následně znovu odzkoušeno na maketě PS a správnost tohoto řešení byla prokázána úspěšným navedením na všechny hlavice PS v automatickém režimu během inspekce PS v roce 2022. Podobným postupem a kombinací analýzy a zkoušek byly úspěšně odstraněny veškeré drobné nálezy zaznamenané z prvního nasazení stendu inspekce tak, aby zařízení mohlo být úspěšně předáno svému provozovateli, JE Temelín po inspekcích v roce 2022.

Závěr

Závěrem lze konstatovat, že zařízení SI-PS při opakovaných nasazení v podmínkách výrobních bloků elektrárny Temelín potvrdilo všechny stanovené cíle požadované jeho provozovatelem v investičním záměru. Za zdůraznění stojí především nesporné výhody oproti předchozímu inspekčnímu zařízení MSIO, které představují výrazně vyšší počet zkontrolovaných PS ve výrazně kratším čase během odstávky bloku, výrazné zkrácení časů na kritické cestě odstávky bloku, vysoká kvalita, přesnost a opakovatelnost získaných výsledků z kontrol PS, či značné zlepšení a ulehčení práce během manipulací a montáží pro obsluhu s příznivým vlivem na snížení kolektivních dávek a zlepšení podmínek bezpečnosti práce.

Potenciál stávajícího řešení stendu inspekce lze navíc dále rozšiřovat díky modulární koncepci jeho konstrukce a tím lze do budoucna zajistit další rozšíření prováděných kontrol PS. Tento aspekt je v dnešní době velmi důležitý, protože mnohem častěji dochází jak ke změnám designu použitých PS, tak i ke změnám jejich dodavatelů. Stend inspekce tak provozovateli bloku umožní provést inspekce v daleko větším počtu kontrolovaných palivových souborů, bez zásadního vlivu na délku odstávky bloku, což je při uvedených změnách typů PS zcela zásadní benefit pro provozovatele elektrárny.

Nový stend inspekce palivových souborů SI-PS tak představuje špičkové technické zařízení umožňující získání cenných dat o stavu provozovaných PS po jednotlivých provozních kampaních v reaktoru. Tyto informace ve vazbě na častější mix provozovaných typů palivových souborů od různých dodavatelů tvoří důležitou část do celkového hodnocení bezpečnosti provozu bloku jaderné elektrárny.

GENERÁLNÍ OPRAVA SOUSTROJÍ TG2 ELEKTRÁRNY SLAPY A TECHNOLOGICKO – OBCHODNÍ KOMPLIKACE, KTERÉ KRITICKY OVLIVŇUJÍ UDRŽITELNOST ÚDRŽBY A OPRAV VODNÍCH ELEKTRÁREN

OVERHAULLING OF TG2 POWER PLANT SLAPY AND TECHNOLOGICAL – BUSINESS COMPLICATIONS THAT CRITICALLY AFFECT THE SUSTAINABILITY OF HYDROPOWER PLANT MAINTENANCE AND REPAIRS

Roman Mašika

ČEZ EVD

Abstrakt

Rozvoj vodní energetiky v České republice je prakticky nemožný, až na výjimky v sektoru tzv. pico-energetiky.

Stávající instalovaná základna vodních elektráren ČEZ, která byla postavena a zprovozněna v 50. – 90. letech 20. století vyžaduje provádění generálních oprav nebo modernizací technologií v cyklu cca 20 let.

Změny vlastnických struktur výrobních strojírenských firem v ČR, stárnoucí ročníky jejich technologických specialistů a neexistence jejich nástupců, včetně hrozeb plynoucích z apokalyptického pohledu politiků a environmentálních aktivistů na energetiku a nově – mezinárodní bezpečnostní krize, mohou způsobit vyřazení významného portfolia osvědčených zdrojů generování silové a regulační energie. Zdvižený prst těchto hrozeb zaznamenal tým odboru Péče o zařízení vodních elektráren ČEZ při realizaci druhé generální opravy turbín na vodní elektrárně Slapy v letech 2020 až 2022.

Abstrakt

The development of hydropower in the Czech Republic is practically impossible, with the exception of the so-called pico-energy sector.

The current installed base of ČEZ hydroelectric power plants, which were built and put into operation in the 1950s-1990s, requires general repairs or technology modernization in a cycle of about 20 years.

Changes in the ownership structures of manufacturing engineering companies in the Czech Republic, the aging years of their technological specialists and the lack of their successors, including the threats arising from the apocalyptic view of politicians and environmental activists on energy and the new - international security crisis, can cause the elimination of a significant portfolio of proven sources of power and regulatory energy generation. The raised finger of these threats was noted by the team of the ČEZ hydroelectric power plant maintenance department during the second overhaul of the turbines at the Slapy hydroelectric power plant between 2020 and 2022.

SLITINA CAVITEC – JEJÍ VLASTNOSTI A POUŽITÍ NA VODNÍCH ELEKTRÁRNÁCH

CAVITEC ALLOY – ITS PROPERTIES AND APPLICATIONS IN HYDRO POWER PLANTS

David Braha

Castolin s.r.o.

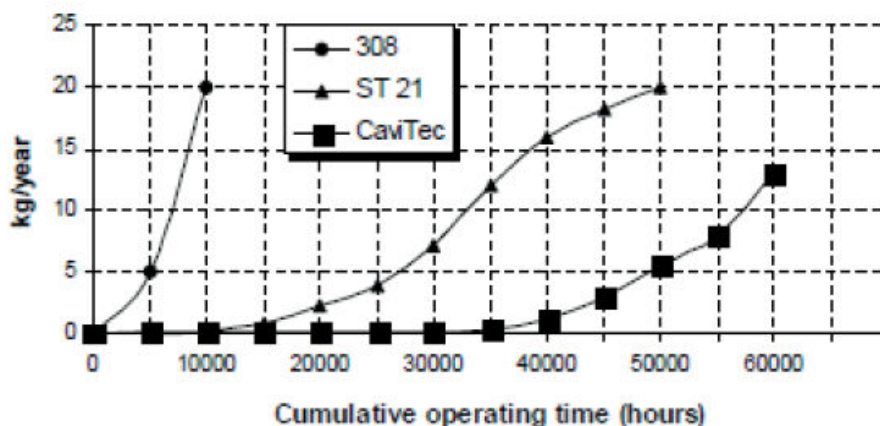
Slitina Cavitec a její použití

Na řece Ontario v Kanadě je soustava přehrad. Vodní elektrárny provozuje firma Hydro-Quebec, která má i vlastní výzkum. Jedním z výsledků jejich výzkumu je austenitická ocel s velkou odolností proti kavitaci, která dostala obchodní název IRECA. Firma Castolin Eutectic obdržela licenci na výrobu přídavných materiálů pro navařování, které vychází z chemického složení této oceli. Vyrábí se ve formě obalené elektrody pro ruční obloukové svařování a také jako trubičkový drát pro svařování v ochranné atmosféře pod obchodním názvem Cavitec SMA a Cavitec GMA.

Jedná se o austenitickou ocel dolegovanou kobaltem a dusíkem. Ta je metastabilní, tedy působením mechanické práce dochází k plastické deformaci a přeměně na martenzit. Mechanické působení kavitačních rázů obecně materiály povrchově zpevňuje a vytvrzením dochází ke vzniku mikrotrhlin a destrukci materiálu, který se projevuje vytrháváním materiálu. Kavitační poškození snižuje účinnost turbíny, protože voda po poškozené ploše dobře “neklouže”. Slitina Cavitec absorbuje velmi mnoho energie, než začne docházet k transformaci na martenzit. Oproti běžné nerez oceli 13/4 má slitina Cavitec 6x delší životnost.

Inkubační doba:

Inkubační dobou myslíme čas, kdy nedochází ke ztrátě materiálu. Ta je u slitiny Cavitec velmi dlouhá. Během ní dochází absorbováním energie k vytvrzování povrchu a změně struktury materiálu. Pokud bychom prováděli kontrolní měření a nezjistili zvýšení tvrdosti, znamená to, že materiál je stále schopen absorbovat energii z kavitačních bublin.



Obr. 1: Úbytek materiálu – srovnání klasické nerez oceli 308, Stellitu 21 a slitiny Cavitec.

Elektrody a trubičkový drát Cavitec je na trhu více než 20 let, bylo publikováno několik studií a používá se s úspěchem v Kanadě, v Jižní Americe. V Evropě pak na Balkáně a také ve Skandinávii. Na Slovensku je jedno původní kolo z nelegované oceli navařeno slitinou Cavitec a je již 10 let v provozu. Myslím si, že by se tento materiál mohl používat více. Vidím dvě příčiny, proč tomu tak není: Nedostatečný marketing a pak nutnost výškolení svářečů.

Vzhledem k legování slitiny, je potřeba dodržovat určité zásady: Zvláště při navařování v polohách není možné používat nízký svařovací proud – pro nalegování dusíkem je potřeba mít tavnou lázeň určité velikosti, aby přebytečný plyn mohl lázeň opustit. Pokud to tak není, návar velice pórovitý. Zkušený svářeč se zaškolí během hodiny. Druhou možností je použít k navařování trubičkový drát. Pro stroje Castolin XuperArc a Fronius TPSi byl vydán synergický program pro trubičkový drát Cavitec. Je možné navařovat ve všech polohách. Produktivita je 2x vyšší než při použití elektrod. Svářečku XuperArc 3000 je možné použít i na montáži, jedná se o kompaktní stroj s váhou 35 kg.

KOROZNĚ ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY SVAROVÝCH SPOJŮ OCELI COR 13/4

CORROSION-FATIGUE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF COR 13/4 STEEL

Josef Strejcius, Zbyněk Špirit, David Bricín a Zdeněk Fulín

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Příspěvek shrnuje výsledky materiálových testů nutných pro definování podmínek iniciace a rychlosti šíření korozně únavových trhlin v opravných svarech lité oceli COR 13/4. Byly hodnoceny svarové spoje provedené s přídatným materiálem Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER 2209 metodami 141 a 135. Pro obě varianty svarového spoje byly stanoveny časované meze únavy ve vodě při asymetrii zátěžného cyklu $R=-1$ a středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa. Pro oba studované svarové spoje byla provedena měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněné zóně oceli COR 13/4 na kompaktních vzorcích zatěžovaných v tahu (CT) při frekvenci 30 Hz a asymetrii cyklu $R=0,1$. Byla provedena fraktografická analýza lomových ploch. Experimentální práce byly realizovány v roce 2021 v rámci projektu NCK DP6 podpořeného TAČR.

Abstract

The paper summarizes the results of material tests necessary for defining the initiation conditions and the rate of propagation of corrosion-fatigue cracks in repair welds of cast steel COR 13/4. Welds made with the additive material Avesta 248 SV, and duplex alloy ER 2209 by welding methods 141 and 135 were evaluated. Timed fatigue limits in water were determined for both welded joint variants at load cycle asymmetry $R=-1$ and mean prestress $\sigma_m = 330$ MPa. For both welded joints studied, measurements of the corrosion-fatigue crack propagation rate in the weld metal and the heat-affected zone of COR 13/4 steel were performed on compact tensile (CT) loaded specimens at a frequency of 30 Hz and a cycle asymmetry of $R=0.1$. Fractographic analysis of the fracture surfaces was performed. The experimental work was carried out in 2021 within the framework of the NCK DP6 project supported by TAČR.

Úvod

Ačkoli fenomén únavy ve vodní energetice není nový, v posledních letech se mu věnuje značná pozornost. Důvodem tohoto rostoucího zájmu o aspekty únavy je zvýšená flexibilita provozu vodních elektráren, která je motivována různými důvody: deregulací energetických trhů, která podporuje dynamičtější provoz bloků, potřebou vyvažování sítí s rostoucí integrací intermitentních obnovitelných zdrojů a v menší, ale potenciálně rostoucí míře změnou klimatu, která zvyšuje variabilitu dostupnosti vody. Protipólem zvýšené flexibility provozu je větší zatížení součástí vodních elektráren únavou, kdy časté změny provozních podmínek a trvalý provoz v podmínkách mimo dimenzování vedou k tomu, že tyto součásti jsou vystaveny většímu počtu cyklických a dynamických zatížení. Kromě toho vysoká konkurenceschopnost mezi výrobcí turbín a generátorů často vede ke konstrukcím vysoce optimalizovaných na účinnost, což může vést ke zmenšování mechanických bezpečnostních rezerv. Desetiletí provozu hydraulických turbín po celém světě prokázala nepopiratelný fakt – opravné svary průtočných částí vodních turbín jsou místem opakovaných poruch způsobených mechanismem korozně-únavového poškození. Svarem indukovaná zbytková napětí představují dominantní faktor ovlivňující šíření únavových trhlin, což může být velký problém u opravného svařování, kdy je provedení účinného tepelného zpracování pro odstranění pnutí obtížně proveditelné.

V projektu NCK DP6 podpořeného Technologickou agenturou ČR byly v roce 2021 provedeny únavové zkoušky svarových spojů oceli COR 13/4 charakterizujících opravné svary oběžných kol vodních turbín vyrobených z této oceli a dalších zařízení průtočné části vodní turbíny jako jsou rozváděcí lopaty, dolní a horní lopátkový kruh pracujících v prostředí vody. Provedené laboratorní experimenty měly za cíl získat materiálové charakteristiky únavového poškození použitelné pro určení pravděpodobnosti iniciace korozně-únavových trhlin a dále data popisující rychlost šíření již vzniklých trhlin.

Experimentální část

Materiál

Měkké martenzitické korozivzdorné oceli s obsahem 12-13 % chromu, 2-5 % niklu a méně než 0,06 % uhlíku se používají ve vodní energetice více jak 50 let. Tyto oceli mají vysokou mez kluzu, vynikající houževnatost, přiměřenou odolnost proti kavitaci a dobrou svařitelnost. Používají se ve stavu kaleném a popuštěném. Vynikající houževnatost vzniká díky tvorbě jemně rozptýleného reformovaného austenitu v důsledku interkritického popouštění při teplotách blízkých 600 °C. Nízký obsah uhlíku pod 0,1 % hmotnosti zlepšuje svařitelnost podporou struktury s menší náchylností ke vzniku trhlin za studena, lepší odolností proti korozi a lepší houževnatostí. Svařované struktury vykazují horší chování ve srovnání se základním kovem (BM), protože proces svařování zahrnuje mnoho modifikací mikrostruktury s vytvořením tvrdších a křehčích mikrostruktur; svarový kov (WM) a tepelně ovlivněná zóna (HAZ) mají nižší odolnost proti rázu a lomovou houževnatost než základní materiál COR13/4. [1,2,3]

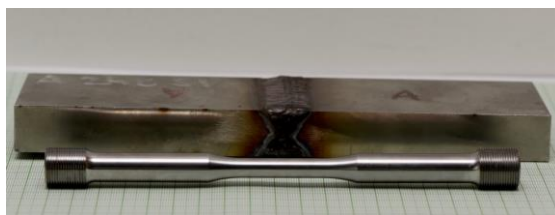
Základní materiál použitý v této práci byla martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN, COR 13/4) v zušlechtěném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu). Materiál byl dodán společností ČEZ a.s. ve formě přilítlých zkušebních bloků. Experimentální materiál byl odebrán z depozitu na elektrárně Orlík v lednu 2021. Jednalo se o několik různých taveb, rozdíly v chemickém složení bloků byly minimální, chemie odpovídala předpokládanému složení oceli COR 13/4. Materiály byly izotropní, struktura byla tvořena popuštěným laťkovým martenzitem s malým množstvím δ feritu. Ve struktuře byly oxidické vměstky. V materiálu byly licí vady ve formě kavit. Obsah reformovaného austenitu činil cca 17 % [4].

Svarové spoje oceli COR13/4

Svarové spoje byly subdodávkou společnosti ČEZ a.s. Pro svařování byly ze zkušebních bloků vyrobeny desky s tloušťkou 20 mm. Z desek byly zhotoveny ve společnosti DN PROFI-WELD, s.r.o. dva typy svarového spoje oceli COR 13/4:

- s přídavným materiálem měkkou martenziticko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV metodou 141 (obloukové svařování wolframovou elektrodou)
- s přídavným materiálem duplexní slitinou ER 2209 metodou 135 (obloukové svařování s tavící elektrodou v aktivním plynu)

Bylo ověřeno chemické složení svarových spojů a provedeno hodnocení mikrostruktury /6/. Ze svařených desek byla vyrobena zkušební válcová tělesa pro zkoušky vysoko cyklické únavy, viz obr. 2.



Obr. 1: Polotovár pro výrobu zkušebních těles pro zkoušky korozní únavy

Návary byly rovněž subdodávkou společnosti ČEZ a.s. Pro navařování byly ze zkušebních bloků z oceli COR 13/4 vyrobeny desky s tloušťkou 50 mm. Na deskách byly zhotoveny ve společnosti DN PROFI-WELD, s.r.o. dva typy návaru:

- s přídavným materiálem na bázi martenziticko-austenitické oceli Avesta 248 SV metodou 141 (obloukové svařování wolframovou elektrodou)
- s přídavným materiálem duplexní slitinou ER 2209 metodou 135 (obloukové svařování s tavící elektrodou v aktivním plynu)

Výška návaru byla 20 mm. Z navařených desek byly elektrojiskrovým obráběním vyrobeny zkušební vzorky pro měření rychlosti šíření únavových trhlin ve vodě.



Obr. 2: Návary duplexní oceli ER 2209 a A/M oceli Avesta 248 SV na oceli COR 13/4

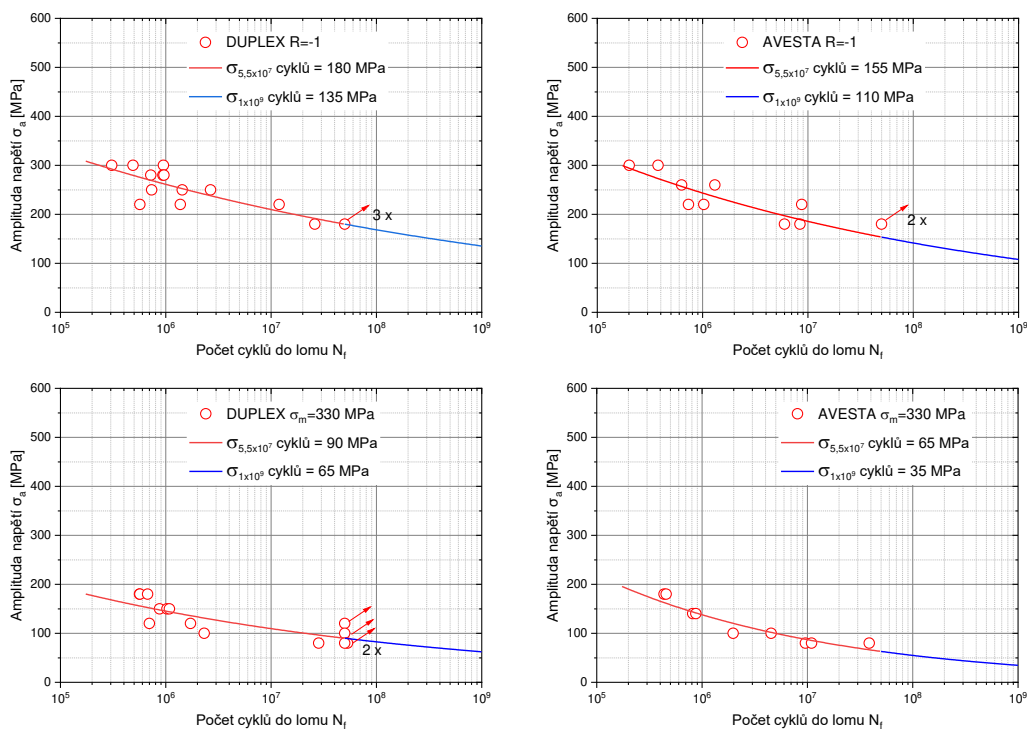
Metodiky stanovení meze časované únavové pevnosti a rychlosti šíření trhlin

Zkoušky vysokocyklové korozní únavy ve vodě byly provedeny na elektromagnetickém pulzátoru se silovou kapacitou ± 250 kN při frekvenci 123 Hz, při jednoosém zatěžování tah-tlak a při asymetrii cyklu $R=-1$ a při středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa. Byla použita válcová zkušební tělesa, svar byl situován uprostřed pracovní části zkušební tyče. Další informace k použité metodice lze nalézt v dříve publikovaném příspěvku [5].

Měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve vodě byla provedena na CT tělesech na stroji Elektropuls 10 kN při konstantní zatěžovací frekvenci 30 Hz, v režimu řízení síly. Pro měření rychlosti šíření trhliny byl použit postup držení konstantní hodnoty horní a dolní síly. Zatěžovací cyklus měl sinusový průběh. Zkušební CT tělesa byla vyrobena elektrojiskrovým obráběním z navařených desek. Pro každý návar byly připraveny dvě série zkušebních těles tak aby osa iniciačního vrubu byla rovnoběžná s rovinou ztavení základního materiálu a svarového kovu. V případě první série byl kořen iniciačního vrubu v TOO oceli COR 13/4, u druhé série vzorků byl iniciační vrub v svarovém kovu v blízkosti linie ztavení se základním materiálem. Iniciační vrub byl vždy orientován kolmo ke směru svarových housenek. Okamžité délky únavových trhlin v CT tělesech byly měřeny na základě změny elektrického potenciálu nad trhlinou při průchodu pulzního stejnosměrného proudu technikou DCPD (Direct Current Potential Drop) s přístrojem DCM2 od firmy Matelec. Pro stanovení okamžitých délek trhlin byl použit kalibrační graf pro ocel COR 13/4 viz práce [5].

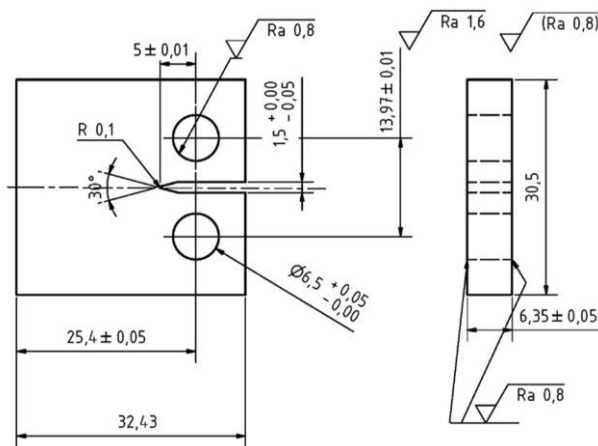
Výsledky a diskuze

Byly hodnoceny dva typy svarů zhotovených metodami 141 a 135 lišících se použitým přídavným materiálem: měkkou martenziticko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV a duplexní slitinou ER 2209. Byly stanoveny Wöhlerovy křivky svarových spojů exponovaných ve vodě při cyklickém zatěžování s frekvencí 123 Hz, při různých hodnotách asymetrie cyklu: při střídavém namáhání a při statickém předpětí 330 MPa, v intervalu životnosti $10^5 - 5 \times 10^7$ cyklů. Z experimentálně stanovených S-N křivek byly extrapolovány hodnoty časovaných únavových pevností pro 10^9 cyklů – viz obr. 3. Vyšší únavová pevnost byla zjištěna pro variantu spoje s přídavným materiálem duplexní slitinou ER 2209, kdy extrapolované meze únavy při shodných režimech mechanického zatěžování odpovídají časovým mezím únavy základního materiálu.



Obr. 3: S-N křivky svařované oceli COR13/4

Pro stanovení rychlosti růstu korozně-únavových trhlin ve vodě a odpovídajících hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí při asymetrii cyklu $R=0,1$ byla použita standardní $\frac{1}{2}$ " CT zkušební tělesa s redukovanou tloušťkou a iniciačním vrubem 5 mm dle výkresu na obr. 4.



Obr. 4: Zkušební tělesa pro zkoušky rychlosti šíření trhlin

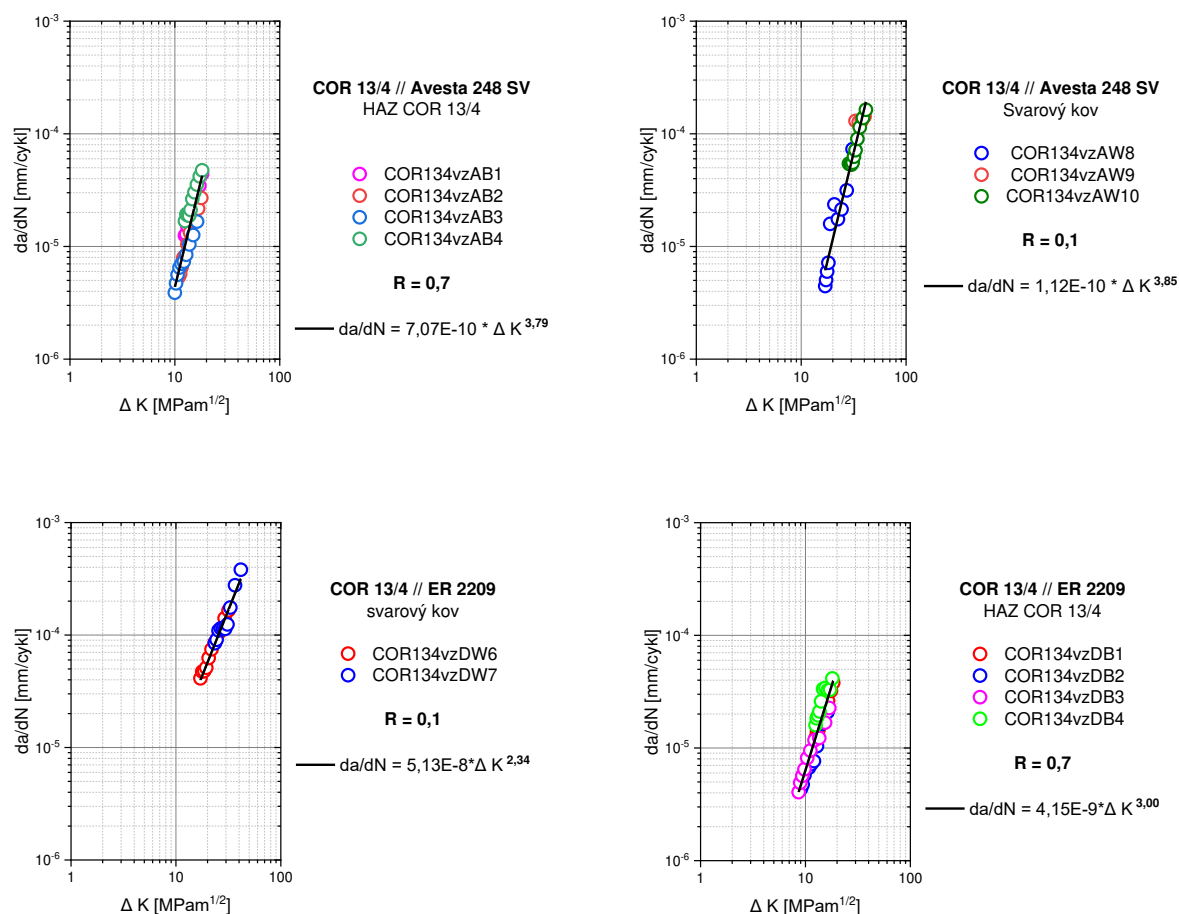
Okamžité délky trhlin byly počítány na základě měřeného elektrického napětí nad trhlinou metodou DCPD a kalibračního grafu pro ocel COR 13/4 ve tvaru:

$$a = 5,051242 + 20,04668 * (U_a/U_r) - 5,03024 * (U_a/U_r)^2,$$

kde a je okamžitá délka trhliny včetně iniciačního vrubu měřená v mm a U_a/U_r hodnota poměru napětí nad trhlinou měřeného a srovnávacího vzorku [5]. Po ukončení testu byly pro kontrolu výpočtu okamžité délky trhlin určeny konečné délky trhlin z lomových ploch po statickém dolomení vzorků. Vyhodnocení experimentálních dat je v práci [6].

Na obr. 5 jsou v grafech zpracovány výsledky stanovení rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněných oblastech základního materiálu při použití přídavného materiálu Avesta 248 SV a slitiny ER 2209 v závislosti na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK . Výsledky jsou platné pro zatěžování v tahu při frekvenci 30 Hz a pro asymetrii cyklu $R=0,1$.

Pro oba studované svarové spoje byly stanoveny odpovídající koeficienty Parisova vztahu.



Obr. 5: Výsledky stanovení rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněných oblastech základního materiálu při použití přídavného materiálu Avesta 248 SV a slitiny ER 2209 v závislosti na hodnotě rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK

Závěr

Byly hodnoceny dva typy svarů/návarů zhotovených metodami 135 a 141, lišících se použitým přídavným materiálem: měkkou martenzicko-austenitickou ocelí Avesta 248 SV a duplex-ní slitinou ER2209. Svarové spoje byly subdodávkou firmy ČEZ a.s.

Byly stanoveny Wöhlerovy křivky svarových spojů exponovaných ve vodě při cyklickém zatěžování s frekvencí 123 Hz, při různých hodnotách asymetrie cyklu: při střídavém namáhání a při statickém předpětí 330 MPa, v intervalu životnosti $10^5 - 5 \times 10^7$ cyklů. Z experimentálně stanovených S-N křivek byly extrapolovány hodnoty časovaných únavových pevností pro 10^9 cyklů. Svarový spoj M/A materiálem Avesta 248 SV vykazuje ve vodě nižší únavovou pevnost než základní materiál ocel COR 13/4. Únavová pevnost svarového spoje duplexní slitinou ER2209 je stejná jako oceli COR 13/4.

Pro oba studované svarové spoje byla provedena měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve svarových kovech a tepelně ovlivněné zóně oceli COR 13/4 na kompaktních vzorcích zatěžovaných v tahu (CT) při frekvenci 30 Hz a hodnotě asymetrie cyklu $R=0,1$, v intervalu rychlostí šíření únavových trhlin $10^{-6}-10^{-4}$ mm/cykl. Byly stanoveny odpovídající koeficienty Parisova vztahu.

Literatura

- [1] PUKASIEWICZ, Anderson, GOUVEIA, Ruimar, CAPRA, André, HENKE, Sérgio a OKIMOTO, Paulo. Effect of interpass temperature on microstructure, impact toughness and fatigue crack propagation in joints welded using the GTAW process on steel ASTM A743-CA6NM. *Welding International*. (2014) vol. 29, p. 433-440, doi: 10.1080/09507116.2014.932983
- [2] PUKASIEWICZ A.G.M., NOVICKI N., HENKE S.L. a CASAS W.J.P. Fatigue crack propagation in welded joints of the steel CA6NM without post welding heat treatment. In *17th International Congress of Mechanical Engineering*. November 10-14, 2003, São Paulo
- [3] TRUDEL A. a SABOURIN M. Metallurgical and fatigue assessments of welds in cast welded hydraulic turbine runners. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2014)*, 22 012015
- [4] ŠPIRIT Z. a BRICÍN D. Katalog korozně-únavových lomů oceli COR13/4 s metalografickým rozbořem mikrostruktury, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2022, PL č. 4295
- [5] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, CHOCHOLOUŠEK, Michal a FULÍN Zdeněk. Pevnostní a únavové charakteristiky materiálu GX4CrNi13.4+QT, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2021, PL č. 3848
- [6] STREJCIUS, Josef, ŠPIRIT, Zbyněk, CHOCHOLOUŠEK, Michal a FULÍN, Zdeněk. Korozně-únavové charakteristiky svarových spojů oceli COR 13/4, Centrum Výzkumu Řež s.r.o., 2022, PL č. 4296

MODIFIKACE HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE POTRUBÍ NAPÁJECÍ VODY V PG VVER 440 - JE EBO3,4

MODIFICATION OF HETEROGENEOUS WELDING CONNECTION OF FEED WATER PIPE IN STEAM GENERATOR VVER 440 - NPP EBO3,4

Václav Novotný

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Projekt řeší záměnu heterogenního svarového spoje na potrubí napájecí vody uvnitř PG na JE V2 Jaslovské Bohunice blok 3,4. Heterogenní svarový spoj se nachází na sekundární straně PG a jedná se o potrubí dimenze DN250, o tloušťce stěny 16 mm z jedné strany z feritického materiálu St20 a tloušťky stěny 10 mm z druhé strany z austenitického materiálu 08CH18N10T. V průběhu dlouhodobého provozu dochází k postupné degradaci heterogenního svaru v tepelně ovlivněné oblasti feritické oceli. Vzhledem ke snaze prodlužování životnosti JE EBO3,4 je nutné nevyhovující heterogenní svar zaměnit za nové řešení – pomocí heterogenního mezipřírubového spoje.

Abstract

The project addresses the replacement of a heterogeneous welded joint on the feed water pipeline inside the steam generator at NPP V2 Jaslovské Bohunice unit 3, 4. The heterogeneous welded joint is located on the secondary circuit of the steam generator and is a pipe of dimension DN250, with a wall thickness of 16 mm on one side made of ferritic steel St20 and a wall thickness of 10 mm on the other side made of austenitic steel 08CH18N10T. During long-term operation, the heterogeneous weld gradually degrades in the heat-affected zone of the ferritic steel. Due to the effort to lifetime NPP EBO3, 4, it is necessary to replace the unsatisfactory heterogeneous weld with a new solution - using a heterogeneous inter-flange joint.

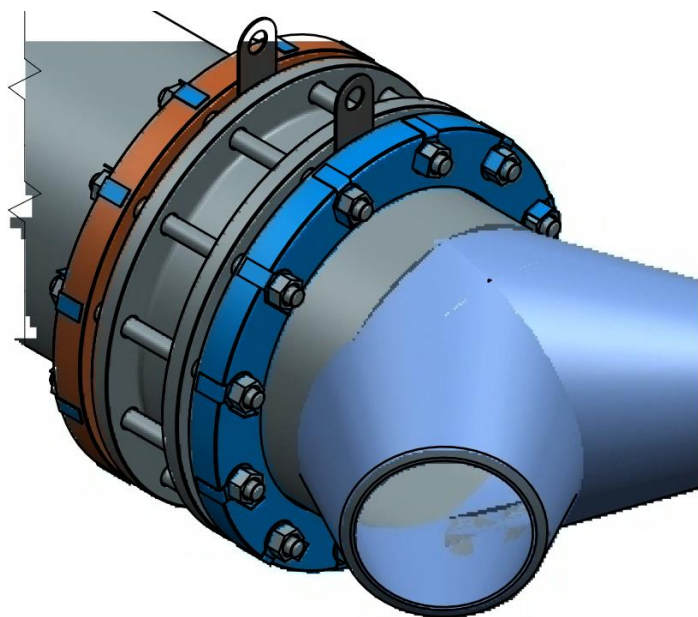
Úvod

Cílem tohoto projektu byla modifikace heterogenního svarového spoje (HSS) na trase rozvodu napájecí vody (NV) uvnitř PG na sekundární straně JE. Hlavním účelem bylo trvalé odstranění heterogenního svaru z pohledu nespolehlivosti a bezpečnosti parogenerátoru. Zhoršující se stav spolehlivosti HSS na NV PG vyvolával v rámci generálních odstávek operativní práce na opravách, či dočasná technická řešení fixace HSS. Pravidelnými kontrolami bylo zjištěno tvoření vnějších celooobvodových trhlin. Současný stav nevyhovoval dlouhodobému provozu a bylo nutné přistoupit k opravě. Těmito opravami nebylo možno spolehlivě zajistit, aby nevzniklo riziko narušení provozování PG. Jako náhrada současného stavu heterogenního svaru byl zvolen potrubní kovaný doměrek v mezipřírubovém provedení, bez potřeby provádění následných NDT provozních kontrol ve výrazně nepříznivém prostředí z pohledu radiační situace.

Potrubí NV je dle Vyhlášky ÚJD SR 430/2011 Z.z. zařazeno do bezpečnostní kategorie BTII.

Koncepce navržené modifikace

Část dosavadního potrubí NV byla vyříznuta (včetně HSS), čímž vznikl prostor pro vložení trubkového mezikusu. Na konce rozříznutého potrubí byly navařeny příruby rozměrově shodné s přířubovým mezikusem. Celé řešení tedy obsahovalo dva přířubové spoje o rozměru DN 250 PN 6 dle normy ČSN EN 1092-1. Tloušťka listu přírub byla z normalizovaného rozměru 24 mm zvětšena na 33 mm včetně těsnicí lišty, neboť bylo potřebné přířubový spoj utáhnout větším utahovacím momentem. Svorníky byly vyrobeny z materiálu 42CrMoS4+QT a bylo nutné je atestačně ověřit, neboť nebyl tento materiál zařazený [5]. Při posuzování vhodnosti nového materiálu pro provozní podmínky se hodnotila schopnost odolávat podmínkám – porušení pevným lomem, porušení křehkým lomem, porušení únavou, porušení korozí, radiační poškození. Na základě vyhodnocení byl tento materiál schválen pro použití na NV uvnitř PG. Sestava nového mezipřířubového provedení je znázorněna na Obr. 1.



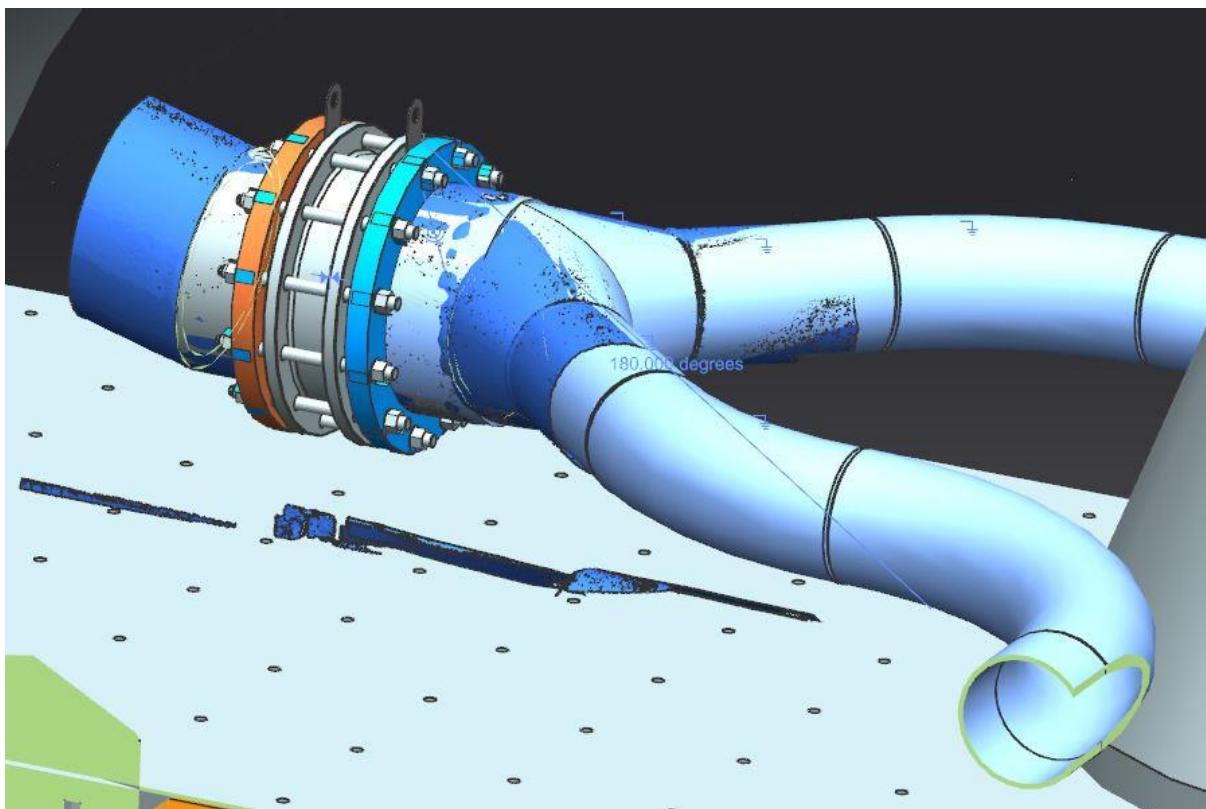
Obr. 1: Schéma mezipřířubového provedení

Do přířubového spoje bylo použito hřebenové těsnění s expandovaným grafitem, ve speciálním provedení, které bylo navrženo pro potřebné utahovací momenty, požadované životnosti a podmínkám prostředí uvnitř PG. Celé řešení bylo koncipováno tak, aby byla montáž fyzicky a časově zvládnutelná (ztížené podmínky uvnitř PG ve velmi omezeném čase).

Před započítím vyřezávání potrubí napájecí vody bylo nutné zafixovat austenitický kalhotový kus a uhlíkaté potrubí tak, aby nedošlo po odříznutí potrubí NV k „poklesu“ ze stávající polohy. Tuto fixaci zajistil přípravek ustavený na mezistěny trubkového svazku PG.

Skutečný stav – 3D skenování

Zjištění skutečného stavu probíhalo vždy v rámci generální odstávky, při roztěsnění bočního vstupu PG. Skenování bylo provedeno za pomoci ručního 3D skeneru, přičemž výstupem byla mračna bodů, která se následně pomocí softwaru převedla do spojitých ploch. Na základě zjištěného skutečného stavu potrubí NV bylo zvoleno přesné umístění nového přířubového mezikusu tak, aby byly realizační práce nejvíce efektivní, primárně z pohledu snížení dávek ionizujícího záření. Na následujícím Obr. 2 je zobrazeno potrubí NV, včetně navržené modifikace.



Obr. 2: Modelování 3D dle Laserscanu – vizualizace

Svařování

Vzhledem ke složitosti montáže byla zvolena metoda svařování 135, která však není schválena normativním předpisem pro tlaková zařízení na území Slovenské republiky [4]. Pro svařovací metodu 135 byla explicitně udělena výjimka, neboť bylo obhájeno použití metody 135 z hlediska časového, ale s přihlédnutím na velmi malý přetlak média.

Z tlakového hlediska se jedná u potrubí NV o prakticky beztlaký systém, neboť se uvažuje v rozvodu NV uvnitř PG s přetlakem 50 kPa vůči parnímu prostoru v PG. V rámci pevnostních výpočtů byly uvažovány všechny zátěžné stavy a jejich kombinace, které jsou definované pro pevnostní výpočet PG. Na přírubách jsou 4 vrstvy svarů, a to je tedy předpoklad záruky těsnosti svarů.

K výběru metody svařování 135 bylo přistoupeno hlavně z důvodu značně nepříznivé radiační situace uvnitř PG a celkového času vyhrazeného na realizaci díla. Při časovém porovnání ostatních svařovacích metod vyplynulo, že u metody 141 vůči 135 vychází metoda 141 přibližně 5,45x delší na svařovací čas. Tento parametr by násobně zvyšoval čerpanou kolektivní efektivní dávku. Pro tuto metodu 135 byla doložena veškerá potřebná kvalifikace.

Závěr

Modifikace záměny HSS za mezipřírubový spoj je z pohledu zajištění prodloužení životnosti elektrárny zcela zásadní. Tento princip náhrady zaručuje, že zásadní technologická zařízení elektráren budou moci být v provozu i v dalších letech a nebude narušena integrita provozu. V roce tomto roce 2022 byla provedena tato popisová modifikace na dvou PG na JE EBO3,4 a v dalších letech budou modifikovány další PG a celá akce bude trvat do roku 2027. V aktuální době začíná zcela obdobná akce na JE EMO1,2.

Na Obr. 3 je uveden modifikovaný spoj po realizaci v rámci odstavení bloku.



Obr. 3: Skutečné provedení po realizaci – PG42

Literatura

- [1] Safety Standards Series No. NS-G-2.13 (2009): *Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations Safety Guide*. IAEA [International Atomic Energy Agency]. Vienna.
- [2] NTD A.S.I., Sekce III – 2020 (2020): *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce III - Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. A.S.I. [Asociace strojních inženýrů]. Praha, Brno.
- [3] NTD A.S.I., Sekce II – 2020 (2020): *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce II – Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí elektráren typu VVER*. A.S.I. [Asociace strojních inženýrů]. Praha, Brno.
- [4] BNS II.5.1/2012: *Zváranie jadrových zariadení*. Bratislava, ISBN 978-80-88806-93-6.
- [5] BNS II.3.3/2011: *Hutnické výrobky a náhradné diely pre jadrové zariadenia*. Požiadavky Bratislava. ISBN 978-80-88806-84-4

ÚNAVOVÉ HODNOCENÍ KRITICKÉHO MÍSTA TNR – PŘIVAŘENÍ KOŠILKY NÁTRUBKU HRK – POMOCÍ ELASTO-PLASTICKÉHO PŘÍSTUPU.

FATIGUE ASSESSMENT OF CRITICAL POINT ON THE RPV, WELDING OF THE HRK SLEEVE USING THE ELASTO-PLASTIC APPROACH.

Petr Gál a Vladislav Pištora

ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež, 250 68, Husinec

Abstrakt

Na technických zařízeních se vyskytuje určité množství svarových spojů s neúplným průvarem. Kořen svaru je potom výrazný koncentrátor napětí, který je při únavovém hodnocení založeném na lineárně elastické analýze silně nevyhovující. Jedná se totiž o singulární místo. Jednou z možností odstranění singularity je provedení elasto-plastického výpočtu a následně také únavového hodnocení založeného na tomto přístupu. Na víku TNR je takové reprezentativní místo např. přivaření stínění (košilky) k přírubě nátrubku havarijní regulační kazety (HRK). Pomocí metody konečných prvků je provedena analýza s elasto-plastickým chováním materiálu. Únavové hodnocení je provedeno z výsledků rozložení deformací v oblasti svaru.

Abstract

There is a certain amount of weld joints with incomplete penetration on technical equipment. The weld's root is a significant stress concentrator, which is strongly unsatisfactory in fatigue evaluation based on linear elastic analysis. This is a singular place. One of the possibilities to remove the singularity is to perform an elasto-plastic calculation and, subsequently, a fatigue assessment based on this approach. On the cover of the TNR, there is such a representative place, for example, the welding of the shield (shirt) to the flange of the nozzle of the emergency regulation cassette (HRK). An analysis with the elasto-plastic behavior of the material is performed using the finite element method. Fatigue evaluation is performed from the results of the distribution of deformations in the weld area.

1. Úvod

Technická zařízení obsahují určité množství konstrukčních uzlů/míst, která díky své geometrii působí jako koncentrátoři napětí. V případě tlakové nádoby reaktoru (TNR) se může např. jednat o svarové spoje s neúplným průvarem jejichž kořeny působí jako silné koncentrátoři napětí. V případě lineárně elastického výpočtu se jedná o singulární body, kde hodnota napětí teoreticky dosahuje nekonečné hodnoty (nekonverguje ke konečnému číslu a je závislá na síti). Hodnocení únavové životnosti v takovém místě potom postrádá smysl, protože bude ve většině případů silně nevyhovující, a navíc závislé na hustotě sítě konečných prvků. Hodnocení takových míst je možné potom provádět pomocí jednoho z následujících postupů (např. dle [1]):

- Pomocí elasto-plastického výpočtu deformací v hodnocené oblasti.
- Metoda nominálních napětí, které se bere ve vzdáleném místě mimo hodnocenou oblast.
- Effective notch stress method – skutečná geometrie v místě kořene svaru je nahrazena efektivním rádiusem o poloměru r .
- Pomocí lomově-mechanického hodnocení – stanovení součinitelů intenzity napětí v hodnocené oblasti (která je pro dané místo interpretována jako čelo trhliny)

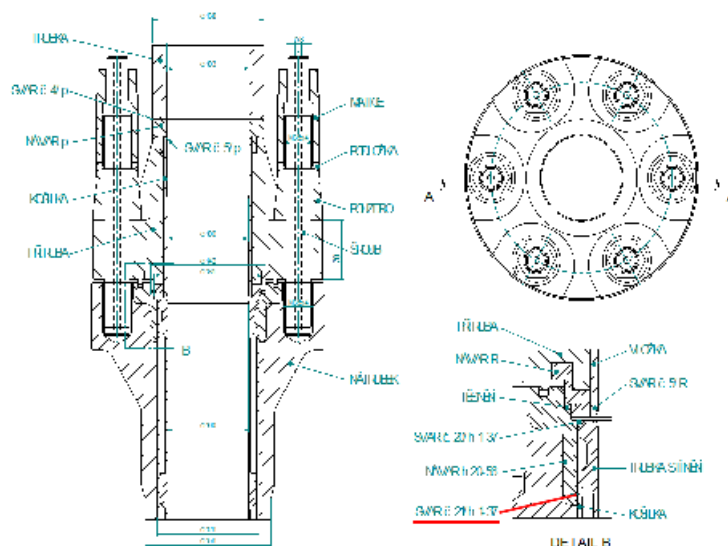
pro všechny zatěžovací stavy v průběhu životnosti komponenty. Na základě těchto součinitelů intenzity napětí se predikuje únavový růst trhliny pomocí Parisova zákona.

Pro hodnocení přivaření košilky k přírubě nátrubku HRK byl zvolen přístup pomocí elasto-plastického určení deformací v kořeni svaru. Pro takové hodnocení není možné využít lineární kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů, protože elasto-plastické řešení je nelineární a deformace závisí na historii. Je tedy potřeba provést výběr dominantních zatěžovacích režimů (redukci jejich počtu), aby bylo možno simulovat celou provozní historii. Po provedení této simulace je stanovena výsledná kumulace únavového poškození.

2. Popis konstrukce nátrubků HRK a přivaření košilek v nátrubcích HRK

Nátrubky HRK jsou vyrobeny z oceli 22 K a na vnitřním povrchu jsou umístěny košilky z austenitické oceli 08Ch18N10T. Košilky jsou přivařeny k návaru, které jsou z materiálů Sv-04Ch19N11M3, na spodním čele nátrubků HRK a k návaru na přírubách nátrubků HRK elektrodou ZIO-8. Smyslem těchto košilek je zamezení styku primárního chladiva se základním materiálem nátrubku HRK (22K). K návaru na přírubách nátrubků HRK jsou dále přivařeny trubky stínění z austenitické oceli, které volně procházejí celým nátrubkem HRK až do prostoru pod víkem. Svary zajišťující polohu košilek a trubek stínění lze považovat za svarové spoje s neúplným průvarem, kořeny těchto svarů tvoří potenciální napětové singularity.

Nátrubek HRK je opatřen dosedací plochou pro vložení těsnicího kroužku z niklu. Dále je zde umístěna drážka pro vložení azbestového těsnění. Příruba nátrubku HRK je opatřena šesti závitovými otvory pro svorníky M36x4 (svorníky jsou opatřeny dvěma závity, na spodní a horní straně). Pomocí těchto svorníků a příslušných matic se přes podložky a pouzdra přitlačí na uvedený niklový těsnicí kroužek dolní příruba pouzdra HRK z oceli 22K. Dosedací plochy mezi podložkami a pouzdry mají kulový tvar. Konstrukční provedení se základními rozměry přírubových spojů je uvedeno na Obr. 1.



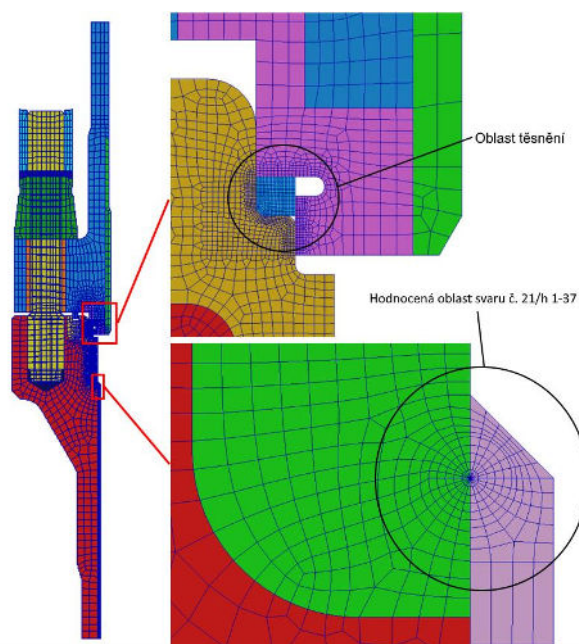
Obr. 1 Konstrukce přírubového spoje nátrubku HRK a označení umístění hodnoceného svarového spoje.

3. Výpočtový model přírubového spoje nátrubku HRK

Výpočtový model obsahuje všechny komponenty dle výše uvedeného popisu konstrukce nátrubku HRK, tedy: horní část nátrubku HRK včetně příruby, spodní přírubu pouzdra HRK, košilku nátrubku HRK, košilku příruby pouzdra HRK, spodní část pouzdra HRK, šroub M36x4, matici, podložku a pouzdro, niklové těsnění.

Výpočtový model byl vytvořen jako dvourozměrný rotačně symetrický model (axisymetrický). Tato definice výpočtového modelu byla zvolena, protože hodnocené místo je symetrické a rotačně symetrický model umožní detailní popis napěťově deformačního stavu v místě „singularity“, tedy v místě přivaření košilky k přírubě nátrubku HRK.

Model je tvořen čtyřúhelníkovými kvadratickými prvky (osmiuzlovými). Tyto prvky umožňují řešení jak mechanické, tak i teplotní úlohy v jednom kroku (tzv. svázaná úloha). Celkový počet prvků v modelu je 4 244 a tomu přináleží 13 717 uzlů. Těsnění muselo být vysítováno dostatečně kvalitně (adekvátně jemná síť), protože při utažení šroubu je silně stlačeno a dochází k velmi silné deformaci. MKP síť a její detaily jsou uvedeny na Obr. 2.



Obr. 2 Výpočtový model přírubového spoje nátrubku HRK a detailní pohledy na místa těsnění a přivaření košilky.

Svorník M36x4, pouzdro, podložka a matice jsou modelovány jako rotačně symetrické prstence s použitím anizotropního materiálu s velmi nízkou tuhostí v obvodovém směru. Závitové hnízdo v přírubě nátrubku a oblast otvoru pro šroub v přírubě pouzdra HRK jsou modelovány jako rotačně symetrické prstence s použitím anizotropního materiálu s tuhostí patřičně modifikovanou. Tento postup je např. uveden v ASME [2] a dále je použit např. v publikaci [3].

Při uvedeném způsobu modelování je model sestaven tak, že osová tuhost, např. prstence modelujícího svorník odpovídá celkové tuhosti všech šesti svorníků po obvodu přírubového spoje a toho je dosaženo pomocí modifikace modulu pružnosti E . Protože se používá obvodová tuhost blízka nule a Poissonova konstanta se také zadává blízka nule, vypočtená napjatost v rotačně symetrickém modelu svorníku odpovídá napjatosti jednoho svorníku (totéž platí pro deformace). Takto byly modelovány i ostatní zmíněné části.

3.1. Materiálové vlastnosti modelu

Pro tento výpočtový model je možné materiálové vstupní parametry rozdělit na tři kategorie:

1. Vlastnosti pro řešení teplotní úlohy – termo-fyzikální vlastnosti,
2. Mechanické vlastnosti pro řešení úlohy napjatosti v lineární oblasti,
3. Mechanické vlastnosti v oblasti elasto-plasticity – po překročení meze kluzu materiálu.

Pro výpočty napětíových polí jsou použity hodnoty modulu pružnosti v tahu E a koeficientu délkové roztažnosti α_t uvedené v NTD ASI, Sekce II [4] a také Poissonova konstanta ν . Pro návrh jsou mechanické vlastnosti použity z NTD ASI, Sekce IV [5].

Jak je již naznačeno výše, pro výpočetní model byl zvolen kombinovaný přístup v oblasti materiálových vlastností. Část modelu byla řešena jako elastická a část modelu byla řešena jako elasto-plastická. Jedná se o části přivaření košilky k nátrubku, košilku, část návaru a niklové těsnění. Pro niklové těsnění byla křivka skutečné napětí vs. skutečná plastická deformace sestavena na základě materiálových testů, provedených v ÚJV Řež, a. s., a to na materiálu získaném z EDU.

Vzhledem k absenci experimentálních dat byly pro austenitické návary, základní materiály a svarový kov stanoveny tři teplotně závislé křivky skutečného napětí vs. skutečná plastická deformace, a to v souladu s postupem dle NTD ASI, Sekce III [6].

3.2. Konstitutivní materiálový model

Pro popis napětíově deformační odezvy materiálu v oblasti elasto-plasticity byl použit kombinovaný materiálový model. Bylo tedy zohledněno izotropní i kinematické zpevnění materiálu v průběhu zatěžování, a to jejich superpozicí. Tím je zahrnuta změna velikosti i pozice plochy plasticity.

3.3. Významné režimy zatěžující přivaření košilky k návaru na přírubě nátrubku HRK

Při provádění elasto-plastických výpočtů není možné využít princip superpozice (lineární kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů) a je tedy nutné provést simulaci celé provozní historie. Na základě předběžných lineárně elastických výpočtů byly vyhodnoceny příspěvky jednotlivých provozních režimů na únavové poškození a pomocí tohoto postupu byly určeny dominantní zatěžovací režimy vzhledem k únavovému poškození, které byly následně zahrnuty do (zjednodušené) provozní historie. Málo významné režimy jsou potom v simulaci vynechány. Na základě těchto analýz bylo zjištěno, že největší příspěvek k únavovému poškození ve svaru košilky k nátrubku HRK mají změny ze studeného stavu do výkonového stavu reaktoru a naopak, a to s uvažováním tlakového zatížení.

3.4. Okrajové podmínky a zatížení výpočtového modelu

Důležitou roli ve výpočtu hraje přivaření košilky k návaru na nátrubku. Ta se přivařuje při předehřevu na 150 °C. Dále jsou ve všech uzlech v rovině řezu nátrubku HRK v nejspodnější části modelu zadána nulová posunutí ve vertikálním směru.

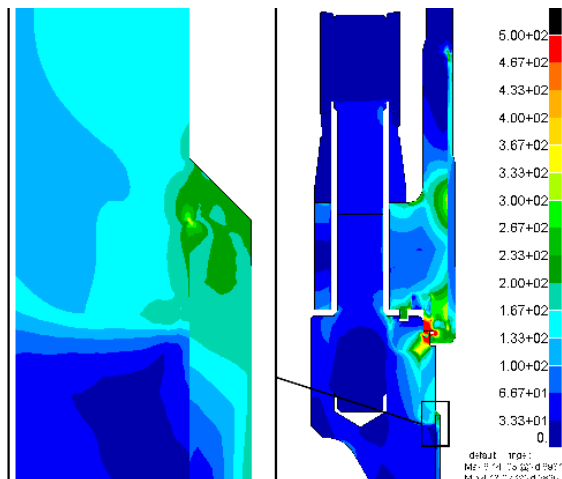
V modelu jsou zahrnuty kontaktní páry simulující interakce jednotlivých komponent. Celkový počet kontaktních párů v modelu je 9.

Na základě výběru dominantních režimů je ve výpočtu nutné uvažovat i tlakové zatížení. Celý vnitřní povrch nátrubku a přírubového spoje byl tedy ve výpočtu zatížen vnitřním provozním přetlakem.

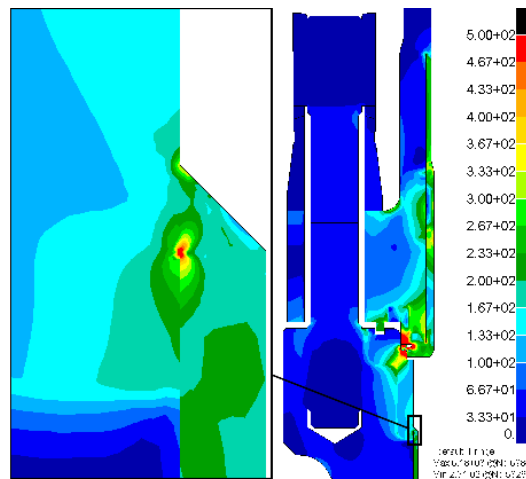
Nedílnou součástí provozní historie nátrubku HRK je i utažení svorníků M 36x4. Pro toto namodelování byl použit zvláštní postup. Svorník, respektive jeho MKP síť, je uprostřed zatížené části rozdělen řezem kolmým k jeho ose. Vzájemné posunutí uzlů ve středech obou koncových řezů rozdělených částí „rozříznutého“ šroubu je zadáno tak, že se šroub prodlužuje (tzn. krajní řezy se posunuly v opačných směrech, toto prodloužení je řízeno tzv. řídicím uzlem). Uzly ležící na rovině řezu jsou s řídicím uzlem svázány pomocí tuhé vazby RBE2, která zajišťuje i zachování rovinnosti obou řezů na svorníku. Hodnoty vzájemného posunutí jsou zadány tak, aby vypočítané prodloužení šroubu (stanovené jako součet prodloužení obou částí šroubu určených jako rozdíl posunutí krajních uzlů těchto částí ve vertikálním směru) dosáhlo zadané a při montáži měřené hodnoty prodloužení šroubů M36 x 4. Během provozu reaktoru proběhlo utažení svorníků pouze jednou, a to před uvedením reaktoru do provozu.

4. Výsledky výpočtů

Na Obr. 3 a Obr. 4 je vyobrazeno pole napjatosti Tresca. Na Obr. 3 je stav po přivaření košilek a utažení svorníků. Protože se košilky přivařují při 150 °C, je potom svar při pokojové teplotě výrazně zatížen a stejně tak i košilky. Po utažení svorníků je značně zatížena oblast těsnění, kudy je přenášen veškerý silový tok. Rozložení napjatosti na konci předpokládaného provozu, tedy po 60 kampaních, je uveden na Obr. 4. Je vidět, že kořen svaru je silně zatížen, napětí dosahuje hodnoty kolem 500 MPa a oblast výrazného napětí se zvětšila. Dále je patrné, že je více zatížena košilka, a to v nátrubku i pouzdru.

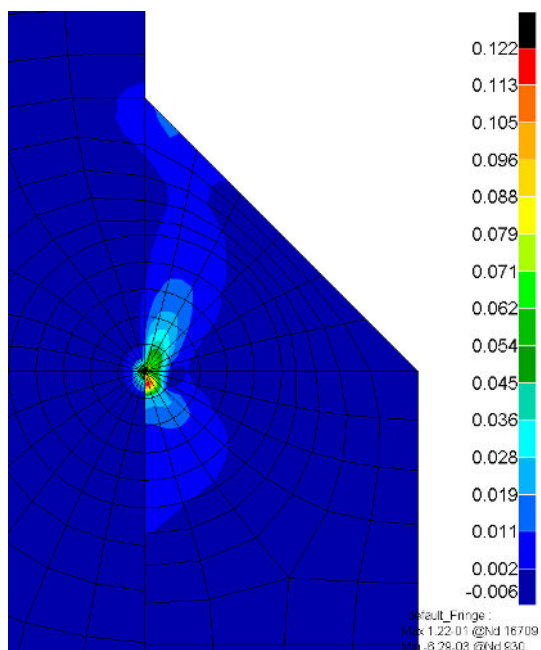


Obr. 3 Rozložení pole napjatosti Tresca – studený stav po utažení svorníku.

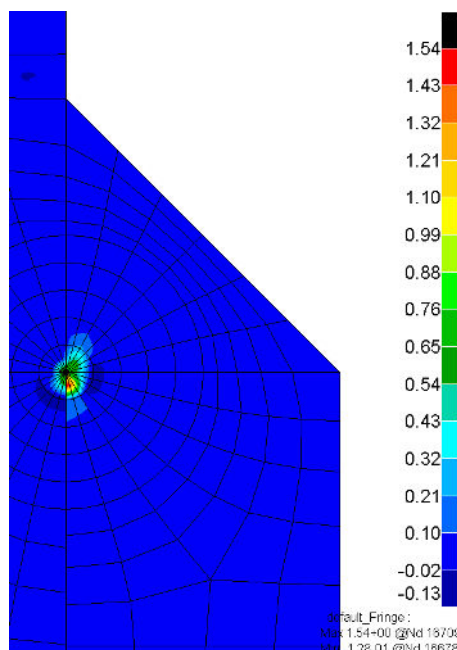


Obr. 4 Rozložení pole napjatosti Tresca – na konci 60. kampaně.

Na Obr. 5 je uvedeno rozložení akumulované plastické deformace po 1 kampani. Je patrné, že plastická zóna je soustředěna do kořene svaru a jeho blízkého okolí. Plastická deformace po 60 kampani je uvedena na Obr. 6, kde je zřejmé, že plastická deformace je nejvíce lokalizována v kořeni svaru a v košilce.



Obr. 5 Rozložení akumulované plastické deformace po 1. kampani.



Obr. 6 Rozložení akumulované plastické deformace na konci 60. kampaně.

5. Únavové hodnocení

Výpočet únavového poškození byl proveden na základě vypočtených elasto-plastických deformací z MKP výpočtu, a to pro celou stanovenou provozní historii. Provedení hodnocení na základě elasto-plastického výpočtu je dle NTD ASI, Sekce III (viz článek 8.5.8), [6] připuštěno. Bohužel zde není ale uveden přesný postup, jakým hodnocení provést. Pro sestavení ekvivalentní deformace do výpočtu kumulace únavového poškození bylo využito Trescova vztahu na základě celkového tenzoru deformace:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{1+\nu} \text{Max}_{i \neq j} (|\varepsilon_i - \varepsilon_j|), \quad (1)$$

kde ν uvedeném vztahu jsou ε_i a ε_j složky hlavních deformací a ν je Poissonova konstanta. Blíže je problematika spojená s tímto typem hodnocení popsána v příspěvku [7].

Na základě MKP výsledků byla vybrána hodnocená místa v oblasti kořene svaru košilkou a bylo ukázáno, že podmínka únavové životnosti je splněna.

6. Závěr

V předloženém článku je prezentováno únavové hodnocení svarového spoje mezi košilkou a návarem na pouzdře nátrubku HRK. Je popsána konstrukce celého nátrubku HRK a také popsán vytvořený MKP model. Je uveden postup výpočtu se zahrnutím elasto-plasticity, protože svarový spoj v kořeni představuje singulární místo v klasickém lineárně pružném výpočtu. Na základě výsledků pevnostních výpočtů byla vybrána místa do únavového hodnocení, které bylo provedeno nestandardně, ale dle normy NTD ASI, Sekce III [6] je tento postup připuštěn.

Literatura

- [1] BARSOUM, Zuheir. *Introduction to Fatigue design of welded structures*. Workshop on Compuatation Fatigue Analysis 2017. Praha, 2017
- [2] ASME (2004), Stresses in Perforated Flat Plates, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.III Appendix A-8000
- [3] ESTRADA, Hector. Analysis of Leakage in Bolted-Flanged Joints Using Contact Finite Element Analysis. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 2015, doi: 10.17265/2159-5275/2015.03.001
- [4] Normativně technická dokumentace ASI, Sekce II, *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, NTD ASI, 2020.
- [5] Normativně technická dokumentace ASI, Sekce IV, *Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. NTD ASI, 2020, ev. č. 19
- [6] Normativně Technická Dokumentace ASI, Sekce III, *Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, 2020, ev. č. 19
- [7] GÁL, Petr, PIŠTORA, Vladislav, POŠTA, Miroslav. Fatigue assessment of Grooves for gaskets in reactor main flange. In: *SMIRT-26: 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Berlin/Potsdam, 2022

VYSOKOTEPLOTNÍ ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ HOMOGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

HIGH TEMPERATURE ULTRASONIC TESTING OF HOMOGENOUS WELDED JOINTS

Jana Veselá a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ)

Abstrakt

Laboratorní ultrazvukové zkoušení svarového spoje bylo realizováno na trubkových tělesech o rozměru 89x6 mm. Zkoušení bylo realizováno k ověření zkušebního systému z pohledu detekce zvoleného typu vad při zvolené teplotě. Zkušební systém zahrnuje ultrazvukový, chladicí a manipulační podsystemy. Zkoušení bylo v první etapě realizováno v rozsahu teplot od 50 °C do 350 °C v kroku po 50 °C na trubkových tělesech. Cílem bylo ověřit vysokoteplotní klíny, systém chlazení, vysokoteplotní vazební prostředek i manipulátor SKOOT HT s ohledem na teplotu, dobu expozice i prostorové požadavky celého systému. Součástí ultrazvukového systému je software určený k simulaci ultrazvukového zkoušení do teploty 350 °C.

Na základě výsledků jsou v druhé etapě zkoušeny desková tělesa o tloušťce 10 a 25 mm do teploty 200 °C. Současně je plánováno realizovat měření na jaderné elektrárně za provozní teploty, která u uvažovaných svarových spojů nepřesahuje 200 °C. V rámci zkoušení vznikají inspekční postupy a bezpečný pracovní postup, nezbytný k provádění zkoušení za vysokých teplot nejen z pohledu bezpečnosti práce, ale i návaznosti a konání jednotlivých kroků zkoušení pro zachování opakovatelnosti měření.

Abstract

Laboratory ultrasonic testing of the welded joint was performed on tubular bodies measuring 89x6 mm. The testing was performed to verify the test system in terms of detecting the selected type of defects at the selected temperature. The test system includes ultrasonic, cooling, and handling subsystems. The testing was carried out in the first stage in the temperature range from 50 °C to 350 °C in steps of 50 °C on tubular test pieces. The aim was to verify the high-temperature wedges, the cooling system, the high-temperature coupling means, and the SKOOT HT manipulator regarding the entire system's temperature, exposure time, and space requirements. The ultrasonic system includes software designed to simulate ultrasonic testing up to a temperature of 350 °C.

Based on the results, plate test pieces with a thickness of 10 and 25 mm up to a temperature of 200 °C are tested in the second stage. At the same time, it is planned to carry out measurements at the nuclear power plant at operating temperatures that do not exceed 200 °C for the considered welded joints. As part of the testing, inspection procedures and a safe working procedure are created; necessary to perform testing at high temperatures not only from the point of view of work safety but also the continuity and holding of the individual testing steps to maintain the repeatability of the measurements.

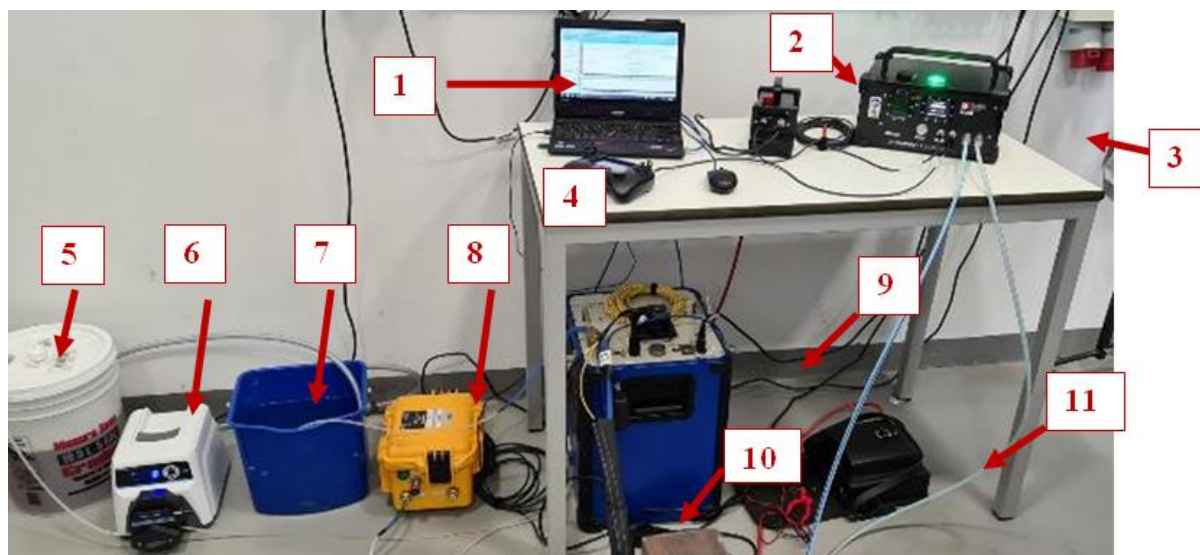
Úvod

První etapa zkoušení trubek 89x6 mm byla realizována v celém rozsahu teplot, které zkušební systém, zejména ultrazvuková sonda s klínem umožňují. Další vývoj, blíže popsáný v článku, v oblasti ultrazvukového zkoušení za zvýšených teplot (HT PAUT) se zaměřil na podmínky reálného zkoušení na elektrárně. Tomuto odpovídají desková zkušební tělesa z uhlíkových ocelí pokrývající potrubí větších průměrů sekundárního okruhu jaderných elektráren, o vnějším průměru nad 370 mm, tloušťce stěny 10 a 25 mm se svarovými spoji. Cílem bylo ověřit detekci a sizing navržených dvou typů vad: elektrojiskrově obráběných vrubů

(EDM) a poloeliptických jiskřených vad (PISC-A), umístěných v kořeni svaru, na úkosu nebo v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Ověřování zkušebního systému proběhlo v rámci tříletého projektu Národního centra energetiky.

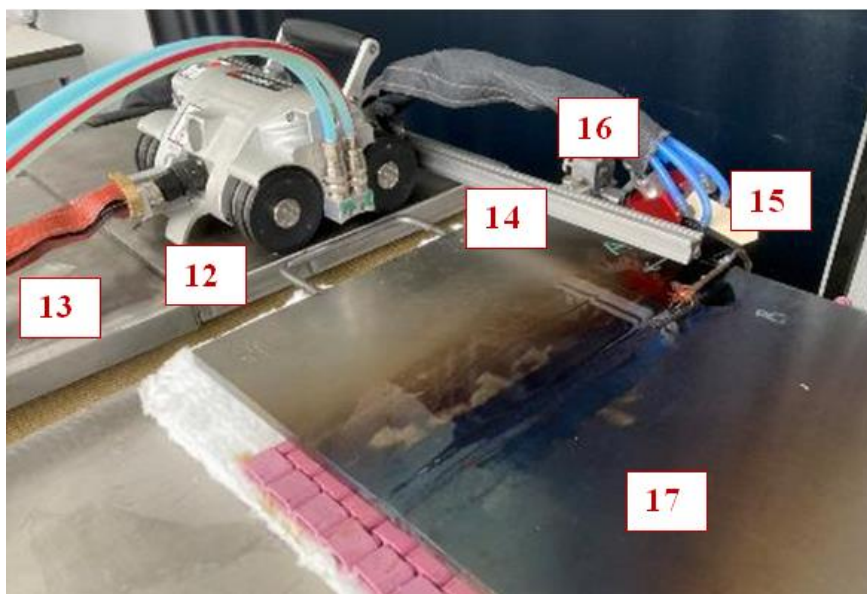
Zkušební systém HT PAUT

Ultrazvukové zkoušení bylo provedeno přístrojem Dynaray 128/128 PR a phased array (PA) sondou s označením 5L16-9.6X10-A10-P-5-OM (dále A10) o zkušební frekvenci 5 MHz a 16 elementy. Sonda má vlastní držák a vysokoteplotní klíny vyrobené s rovným povrchem pro zkoušení na měrkách a deskových ZT a se zakřivením na vnější průměr 89 mm válcových zkušebních těles [1]. Součástí držáku sondy a klínu je enkodér, který lze využívat pro záznam polohy sondy při ručním zkoušení na měrkách. Zkoušení na ZT bylo realizováno manipulátorem SKOOT HT, který má vlastní enkodér. Vysokoteplotní klíny jsou chlazeny vodou a druhá sada hadiček přivádí drážkami v klínu teplotně odolné tekuté vazební médium pro dokonalý kontakt mezi sondou a zkoušeným povrchem. Celý zkušební systém skládající se z podsystémů chladicího, ultrazvukového a manipulačního je dokumentován na obr. 1 a 2.



- 1 – ovládací notebook se SW Ultravision 3, 2 – transformátor systému SKOOT HT, 3 – chladič a hadice pro SKOOT HT, 4 – ruční ovladač manipulátoru SKOOT HT, 5 – vysokoteplotní vazební médium, 6 – čerpadlo pro vazební médium, 7 – zásobník vody pro chlazení sondy, 8 – čerpadlo chladicí vody, 9 – přístroj Dynaray, 10 – přívodní kabel k ultrazvukové sondě společně s hadičkami pro přívod vazby a chladicí vody v ochranném obalu, 11 – zařízení pro bodování termočlánků

Obr. 1: Zkušební systém používaný při HT PAUT

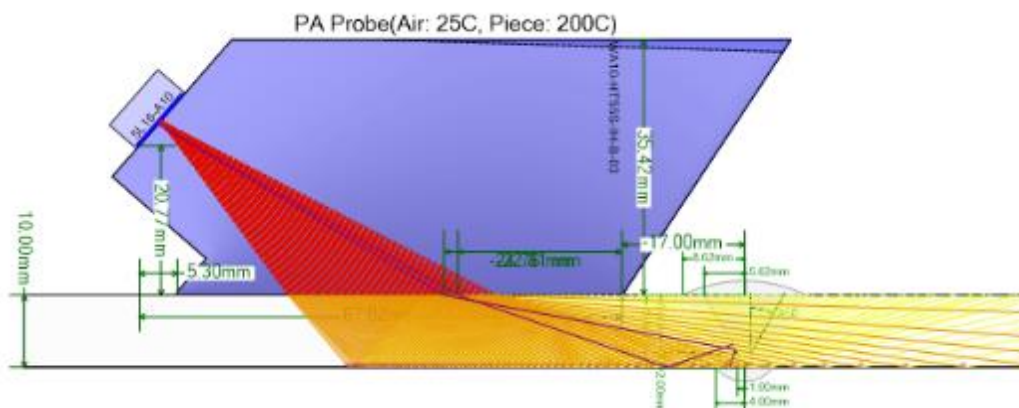


12 – manipulátor SKOOT HT, 13 – přívodní kabel, 14 – rameno pro uchycení sondy,
15 – sonda s klínem, 16 – držák sondy, 17 – deskové ZT

Obr. 2: Zkušební systém používaný při HT PAUT (pokračování)

SW BeamTool9

Simulační software umožňuje provádět simulaci zkoušení vybranou sondou pro danou geometrii tělesa až do teplot 350 °C s uvažováním změn fokusačních zákonů vlivem teploty [2]. Vizualizace sondy na zkoušeném tělese společně s vyzařováním ultrazvukového svazku je na obr. 3.



Obr. 3: Vizualizace PA sondy s klínem pro deskové ZT s vyzařovaným ultrazvukovým svazkem

Měrky a zkušební tělesa

Měrky byly vyrobeny ze stejné oceli jako zkušební tělesa (ZT). Jejich tloušťka byla o 5 mm větší než tloušťka deskových ZT. Měrky s válcovými vývrty o průměru 2 mm byly určeny k ověření citlivosti ultrazvukového zkoušení technikou phased array v rozsahu od pokojové teploty až do 200 °C. U měrky o tloušťce 15 mm z oceli 11 373 byly umístěny čtyři vývrty horizontálně a tři vertikálně, u měrky o tloušťce 30 mm vyrobené z oceli 12 021.1 bylo vertikálních vývrťů celkem sedm. Ohřev měrek byl realizován pomocí topných deček a zdroj ohřevu byl regulován kontrolním termočlánekem umístěným v blízkosti zkušebního povrchu.

Celkem byla vyrobena dvě desková zkušební tělesa (ZT). Značení těles, počet i typ vrubů shrnuje Tab. 1.

Tab. 1: Značení zkušebních těles

Označení	Materiál	V svar	Typ, počet a umístění vrubů		
ZKT 10	11 373	homogenní	EDM	3	svar
ZKT 25	12022.1	homogenní	PISC-A	3	svar

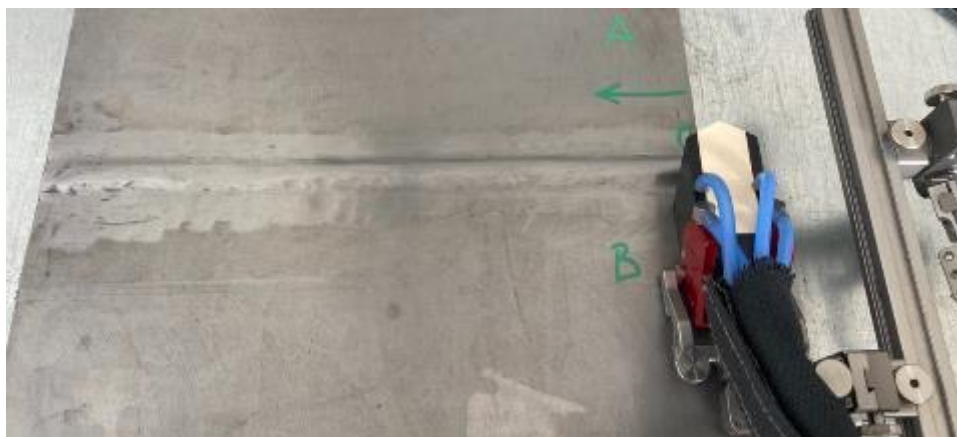
Délka tělesa byla zvolena s ohledem na umístění manipulátoru včetně ramínka pro upevnění PA sondy. Umístění svarového spoje, tj. vzdálenost od čela desky byla zvolena s ohledem na možnosti výroby náhradních vad typu EDM nebo PISC-A v kořenové oblasti svaru.

Deska z materiálu 11 373 o rozměrech 750x350x10 mm s tupým svarem typu V byla označena jako těleso ZKT 10 a obsahuje 3 vruby typu EDM. Druhé těleso o rozměrech 450x350x25 mm s tupým V svarem, označené jako ZKT 25 bylo vyrobeno z oceli 12 021.1 a do tělesa byly vyjiskřeny tři vruby typu PISC-A.

Ultrazvukové zkoušení

Při vysokoteplotním UT jsou klín i zkušební těleso vystaveny efektu indukované teploty a v klínu je výrazný teplotní gradient, viz obr. 4. Rozdíl teploty mezi kontaktní plochou klínu a vstupem ultrazvukového svazku ze sondy do klínu v místě chlazení je velký. S rostoucí teplotou klesá rychlost ultrazvuku a současně roste dráha ultrazvuku v klínu díky skew efektu. Rychlost ultrazvuku se tak při průchodu klínem s ohledem na teplotní pole mění průběžně a na rozhraní klín-ZT dochází ke změně místa vstupu ultrazvukového svazku do zkušební tělesa i změně úhlu, pod nímž ultrazvukový svazek do tělesa vstupuje [3].

Výsledkem změn rychlosti ultrazvuku v klínu i ZT je rozdílná doba průchodu ultrazvuku ve srovnání s pokojovou teplotou, což má dopad na přesnost určení polohy indikace. Deformaci ultrazvukového svazku řeší použití SW BeamTool9, který pro zvolenou teplotu deformaci svazku vypočítá a pro nastavené parametry zkoušení včetně dat týkajících se zkušební tělesa vygeneruje vlastní Focal Laws.

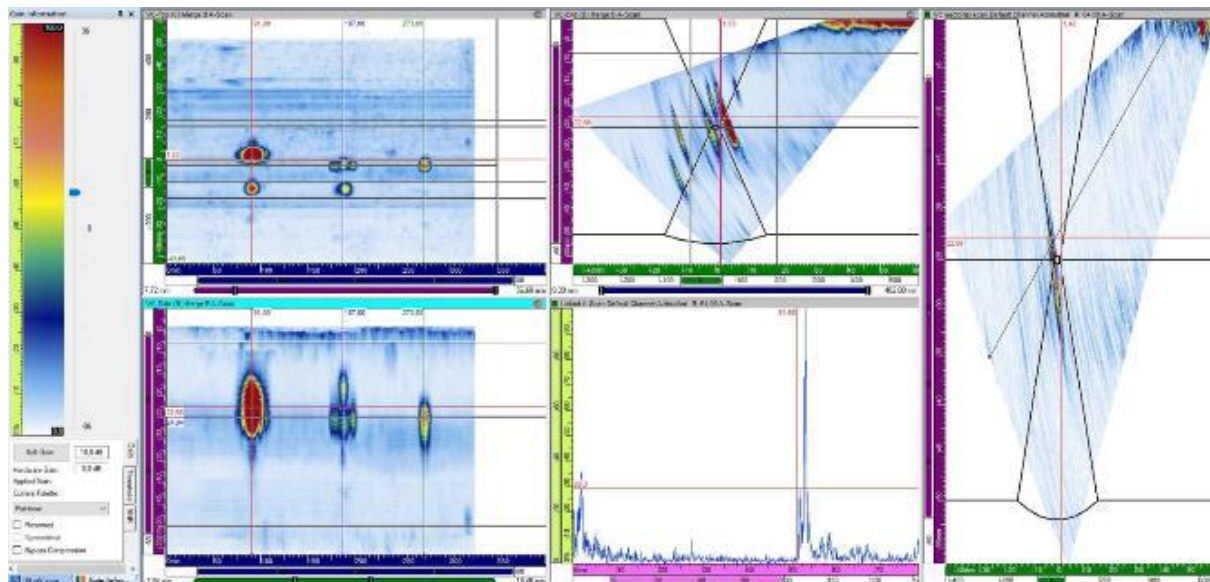


Vstupní ultrazvukové měření bylo provedeno na obou ZT při pokojové teplotě. Při měření z obou stran svarového spoje, strany označeny A a B byly detekovány vždy všechny tři vruby typu EDM i PISC-A. Byl zjištěn vliv pohybu sondy na měřené výsledky, tedy zda je sonda tlačena ramínkem, nebo tažena za ramínkem. Proto byla provedena na každé straně svaru vždy dvě měření, a to z nulového bodu a zpět, obr. 4.

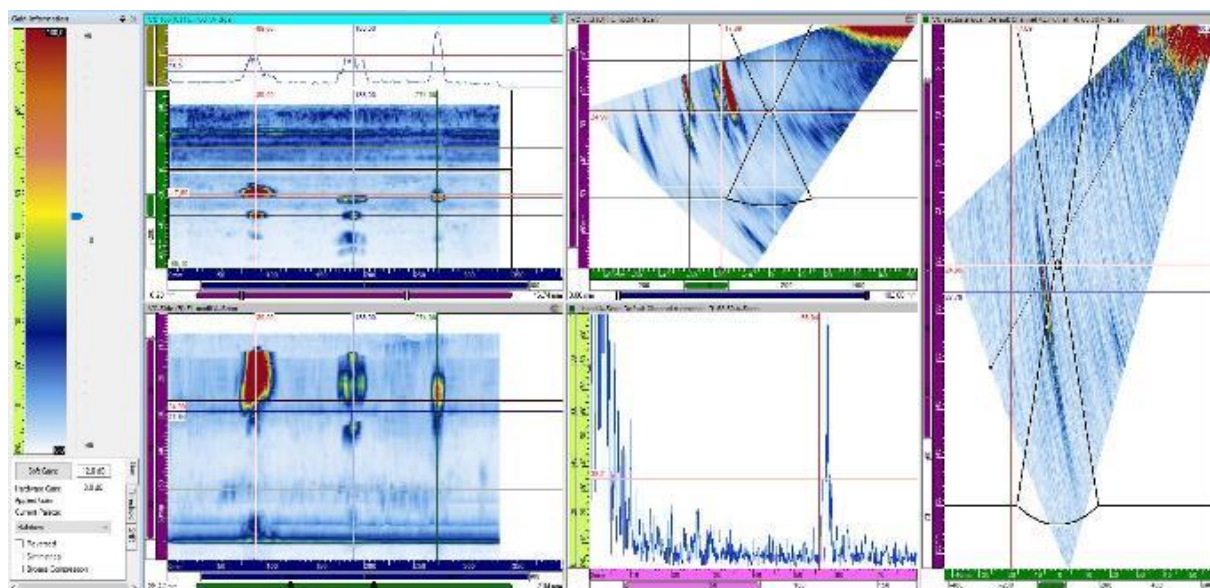
Obr. 4: Zkušební těleso ZKT 10 s vyznačením stran svaru a směrem zkoušení

Vstupní měření za pokojové teploty slouží k získání výchozího souboru dat pro následné zpracování simulací zkoušení za dané zvýšené teploty v SW BeamTool 9.

Pro srovnání jsou uvedeny ultrazvukové záznamy vstupního měření tělesa ZKT 25 při teplotě 20 °C a při maximální teplotě 200 °C, pro stejnou stranu svaru a pohyb PA sondy, obr. 5 a 6. Vstupní měření je realizováno s teplotně odolným vazebním médiem, které musí být používáno při měření za zvýšených teplot. Pro zkoušení bylo použito sektorové skenování.



Obr. 5: Vstupní PAUT tělesa ZKT 25 při 20 °C, strana B, měreno od nulového bodu



Obr. 6: HT PAUT tělesa ZKT 25 při 200 °C, strana B, měreno od nulového bodu

U obou zkušebních těles s různými typy vrubů byly vady v celém zkoušeném rozsahu detekovány. K sizingu, určení rozměrů vadové indikace, bylo využito difrakčních signálů (jsou-li k dispozici) nebo funkce Contour, případně echodynamiky ve vyhodnocovacím softwaru Ultravision 3. Délka vadových indikací byla vyhodnocena pomocí C-skenu a jejich výška (hloubka vady) pomocí B-skenu. Bez ohledu na rozměr vrubů a jejich polohu vůči svarovému spoji lze konstatovat, že u tělesa ZKT 10 byl maximální rozdíl délky vrubu od výkresu – 2 mm a hloubky -1,3 mm. U tělesa ZKT 25 byly rozdíly větší, u délky až -6 mm a výšky +2,7 mm. Rozdíl je zřejmě způsoben typem umělé vady a rozdílnou tloušťkou těles.

Závěr

Pro měření je nezbytné vytvořit Skenovací plán a realizovat ho v SW BT9 pro uvažovanou teplotu zkoušení. Při změně teploty je doporučeno provést změnu úhlů rozevření ultrazvukového svazku a upravit tzv. Index offset, tj. vzdálenost čela klínu v místě kontaktu se ZT k ose svaru. Výchozí parametry zkoušení při 20 °C by tak měly být postupně upravovány. Při přípravě souborů FL pro měření je nutné brát v úvahu problematiku kompatibility výstupu SW BT9 v podobě souborů FL pro jednotlivé teploty zkoušení, které nelze bez modifikace použít v SW Ultravision 3 zkušebního zařízení Dynaray.

Před zahájením každého měření je důležité provést kontrolu všech částí zkušebního systému, jejich funkčnosti a připojení, propojení. Celkem bylo provedeno 50 základních měření za teplot od 20 do 200 °C se skenovací rychlostí 10 mm/s a průtokem vazebního média 6–10 ml/min. Okruh chladicí vody zajišťující chlazení klínu v místě připevnění PA sondy se spouští s předstihem 5–10 minut před zahájením zkoušení. Minimální množství chladicí vody v zásobníku je 3 litry. Pro realizaci ultrazvukového zkoušení je také důležitý zdroj ohřevu, zajišťující stabilní teplotní pole na povrchu zkušebního tělesa a jeho řízení pomocí zpětnovazebního termočlanku včetně nastavování a regulace na základě zkušeností.

Pro praktickou realizaci měření je nezbytné dodržování všech pokynů uvedených v pracovním postupu PP55, který byl vypracován pro interní pracoviště Centra výzkumu Řež a jeho velká část je aplikovatelná při zkoušení na elektrárně.

Poděkování

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

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.

Literatura

- [1] GINZEL, R, MARVASTI, MH and SINCLAIR, AN, Practical Ultrasonic Phased Array Elevated Temperature Technique Development. *Material Science. Insight*, 2014, vol. 56, Nr. 5, pp. 256-263. <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.5.256>
- [2] MARVASTI MH and SINCLAIR AN (2014) Phased array inspection at elevated temperatures. *Material Science IEEE International Ultrasonic Symposium*. 2014 DOI:10.1109/ULTSYM.2014.0210
- [3] MCLAY A and VERKOOIJEN J (2012) Ultrasonic inspections at elevated temperature. *Insight*, 2012, vol. 54, Nr. 6, pp. 307-310(4). <https://doi.org/10.1784/insi.2012.54.6.307>
- [4] ATKINSON I, GREGORY C, KELLY SP and KIRK KJ, Ultrasmart: Development in ultrasonic flaw detection and monitoring for elevated temperature plant applications, *ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2007 <https://doi.org/10.1115/CREEP2007-26411>
- [5] MCMILLAN JD and VOLLERT DK, High-Temperature Ultrasonic Examination and Sizing of Thermal Fatigue Cracking in Reactor Effluent Piping, *ASME 2005 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2005, PVP2005-71779, pp. 133. <https://doi.org/10.1115/PVP2005-71779>
- [6] EPRI, *Elevated-Temperature Nondestructive Evaluation Development and Application*, technical report 3002010302, 2017

KOMPLEXNÍ POSOUZENÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI TURBÍNOVÉHO TĚLESA NA ZÁKLADĚ AKTUÁLNÍCH MATERIÁLOVÝCH DAT ZÍSKANÝCH METODOU MALÝCH VZORKŮ

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE OF THE TURBINE BODY BASED ON CURRENT MATERIAL DATA OBTAINED USING SUB-SIZED SPECIMENS

Eva Chvostová, Jaroslav Koc, Pavel Konopík a Jindřich Vokáč

COMTES FHT a.s., Dobřany

Abstrakt

V průběhu provozování dochází vlivem dlouhodobého působení provozních podmínek (namáhání, teplota, tlak, prostředí) k degradaci vlastností materiálů stěžejních komponent energetických zařízení, což může vést ke snížení až ztrátě spolehlivosti a bezpečnosti při jejich dalším provozu. Znalost aktuálních materiálových vlastností je pro predikci zbytkové životnosti daného zařízení klíčová. Semidestruktivní odběr polotovaru na výrobu miniaturizovaných zkušebních těles a jejich zkoušení širokým portfoliem zkušebních metod je cestou, jak tyto aktuální vlastnosti zjistit a změřit. V článku je popsána použitelnost těchto zkušebních metod pro konkrétní případ turbínového tělesa.

Abstract

During operation, due to the long-term effect of operating conditions (stress, temperature, pressure, environment), the properties of the materials of the core components of energy equipment degrade, which can lead to a reduction or loss of reliability and safety during their continued operation. Knowledge of the current material properties is crucial for predicting the residual life of a given device. A semi-destructive sampling of the semi-finished product for producing miniaturized test specimens and their testing with a broad portfolio of test methods is the way to find out and measure these current properties. The article describes the applicability of these test methods for the specific case of a turbine body.

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.

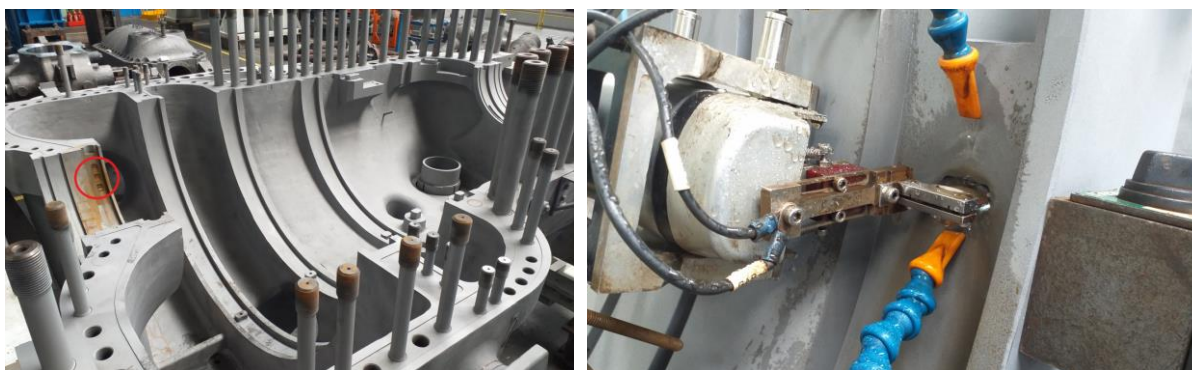
Experimentální materiál

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]



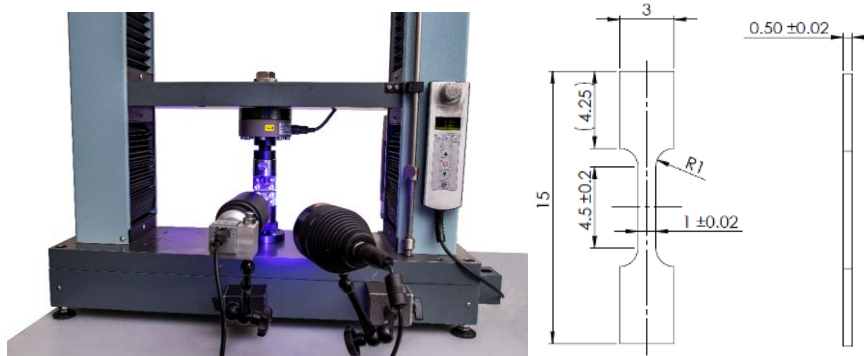
Obr. 1 Fotografie spodní části vnějšího ST tělesa.



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 Tab. 1, kde jsou zároveň porovnány se vstupními údaji a předpisem pro daný materiál.

Tab. 1 Porovnání výchozích a aktuálních hodnot.

Teplá část	R _{p0.2}	R _m	A	Studená část	R _{p0.2}	R _m	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 přerazena na kladivu Charpy o kapacitě 15 J. Z výsledků zkoušek byla stanovena přechodová teplota pro tělesa Mini Charpy se známý korelačním přepočtem +cca 65 °C. [2,3] a odhad nárazové práce KV. Výsledky jsou uvedeny v Tab 2.

Tab. 2 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

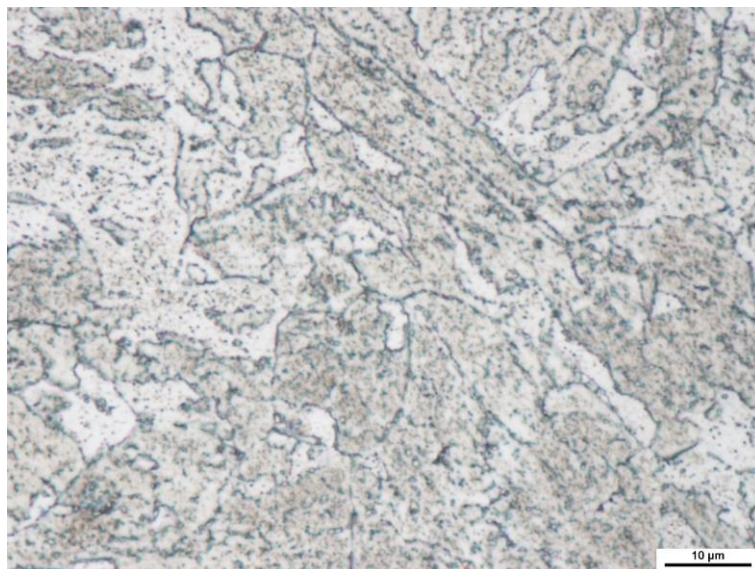
Odběrné místo	Tt50%SFA	Tt50%SFA odhad	Studená část	KV	KV odhad
	°C	°C		J	J
	3x4x27	10x10x55		3x4x27	10x10x55
Teplá část	16	81	Teplá část	3,9	24±12
Studená část	-37	28	Studená část	7,0	70±19

Pro porovnání výsledků nebyla dodána min. 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 kavitačního 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 mikrostruktuře 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 nejkomplexnější 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*. Dobruška, červenec 2022, technická zpráva, PZP 220707.
- [2] WALIN K., *Fracture Toughness of Engineering Materials*. ISBN: 978 0 9552994 6 9.
- [3] CHVOSTOVÁ, Eva. 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

VÝVOJ NÁHRADNÍHO MATERIÁLOVÉHO ATESTU PRO KOVOVÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY JE S VYUŽITÍM UMĚLÉ INTELLIGENCE

THE DEVELOPMENT OF A SUBSTITUTE MATERIAL CERTIFICATE FOR METAL STRUCTURAL MATERIALS WITH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Petr Polcar ^{a)}, Ladislav Kander ^{b)}, Karel Liška ^{a)} a Marek Bělohoubek ^{a)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, s.r.o., Tylova 1581/46, 301 001 Plzeň, Česká republika

^{b)} Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Abstrakt

Příspěvek informuje o vývoji technologie hodnocení materiálových vlastností kovových konstrukčních materiálů používaných na JE využívajících výsledků small punch testů SPT a predikce pomocí neuronových sítí pro případy, kdy není možné hodnocení standardními ani miniaturizovanými technikami zkoušení.

Abstract

The paper reports on the development of technology for evaluating the material properties of metallic structural materials used at NPPs using the results of small punch SPT tests and prediction using neural networks for cases where evaluation by standard or miniaturized testing techniques is not possible.

Motivace a cíl

Hlavní motivací pro vývoj nové technologie pro hodnocení kovových komponent jaderných elektráren byly komplikace, které vznikly při hodnocení na elektrárnách Dukovany, Temelín a Mochovce. Zároveň se aktuálně předpokládá prodlužování životnosti stávajících zdrojů a jejich další rozvoj. Je tedy žádoucí rozšířit existující materiálové databáze, rozšířit přístup k metodám zkoušený (NTD. A.S.I.) a navrhnout možnost hodnocení materiálových vlastností na základě využití metod neuronových sítí a mnohaletých zkušeností s jejím použitím při hodnocení v případech, kdy není možné odebrat zkušební materiál (např. nainstalované a nedostupné komponenty). Dílčí motivací je snížení nákladů na materiálové testy (náročné destruktivní testy lze nahradit vyhodnocením s využitím umělé inteligence).

Metoda SPT je jednou z diagnostických metod uvedených v NTD A.S.I., Sekce V a povolených pro hodnocení materiálu používaných v JE. Metoda SPT byla rovněž nedávno standardizována jak v ASTM (ASTM E 3205 z roku 2021), tak v EN (EN 10371 z roku 2022). Dílčím úkolem v rámci projektu je aktualizovat přístupy k SPT tak, aby byly dodrženy příslušné standardy, eventuálně rozšířit současný přístup k metodám zkoušení (NTD A.S.I.).

V rámci projektu CESEN [1, 2] byla realizována studie proveditelnosti, která poukázala na značnou perspektivu využití metod umělé inteligence (konkrétně strojového učení) pro hodnocení materiálů. Prověřované neuronové sítě dokázaly (po předchozím tréninku s využitím materiálových databází) estimovat mechanické vlastnosti kovového materiálu na základě výsledků SPT testu s přesností odpovídající chybovosti reálných mechanických zkoušek. Na aktivity projektu CESEN nyní navazuje projekt TAČR č. TK04020240 s cílem uvést je do aplikační praxe nejen pro potřeby ČEZ DJE. Vyvinutá metodika hodnocení umožní poměrně snadno, z malého vzorku, potvrdit kvalitu dodávaného materiálu, odebrat malý vzorek a provést vyhodnocení tam, kde velký vzorek odebrat nejde apod.

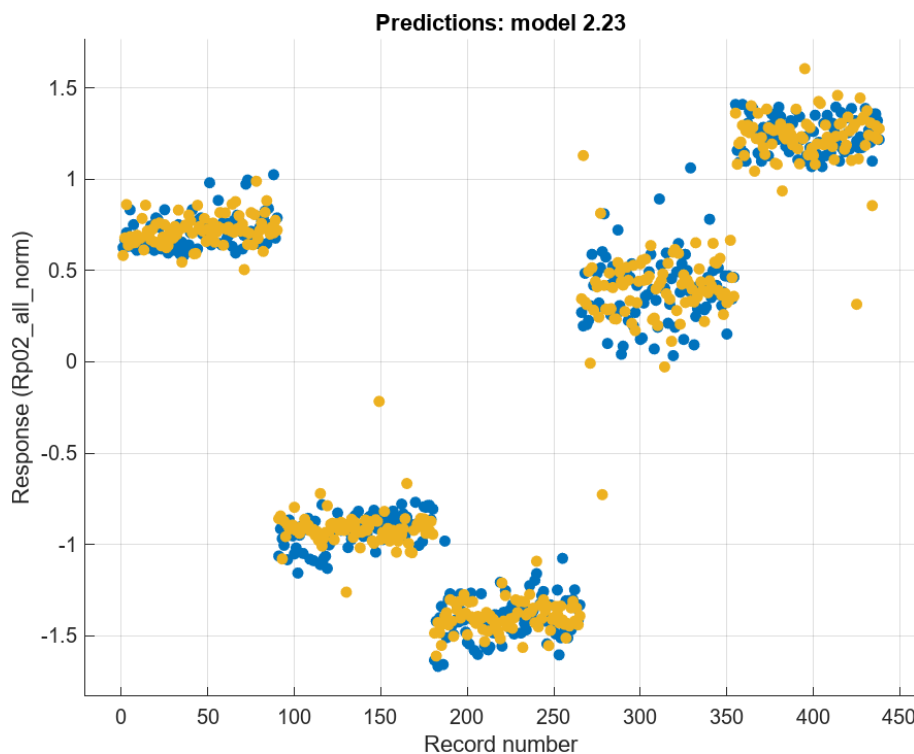
Princip nového hodnocení

Využitím algoritmů strojového učení pro regresní úlohy je vytvořen materiálový model, na jehož vstupu jsou výsledky SPT testu a na výstupu mechanické vlastnosti daného materiálu, či skupiny materiálů. Model byl vytvořen na základě dostupné databáze experimentů a zároveň ze zkoušek, které sloužily k rozšíření datové sady. V rámci projektu byly sledovány vlivy použitých algoritmů (včetně struktury neuronové sítě) a velikosti datasetu. Kromě neuronových sítí byly použity i jiné metody strojového učení jako support vector machines (SVM), regresních stromů a metod lineární regrese [3].

Při nasazení v praxi tedy bude realizován SPT test, jeho výsledky budou vyhodnoceny materiálovým modelem (umělou inteligencí) s cílem poskytnout kompletní sadu mechanických vlastností bez nutnosti odebírat další materiál a provádět jiné mechanické zkoušky než SPT.

Průběžné výsledky

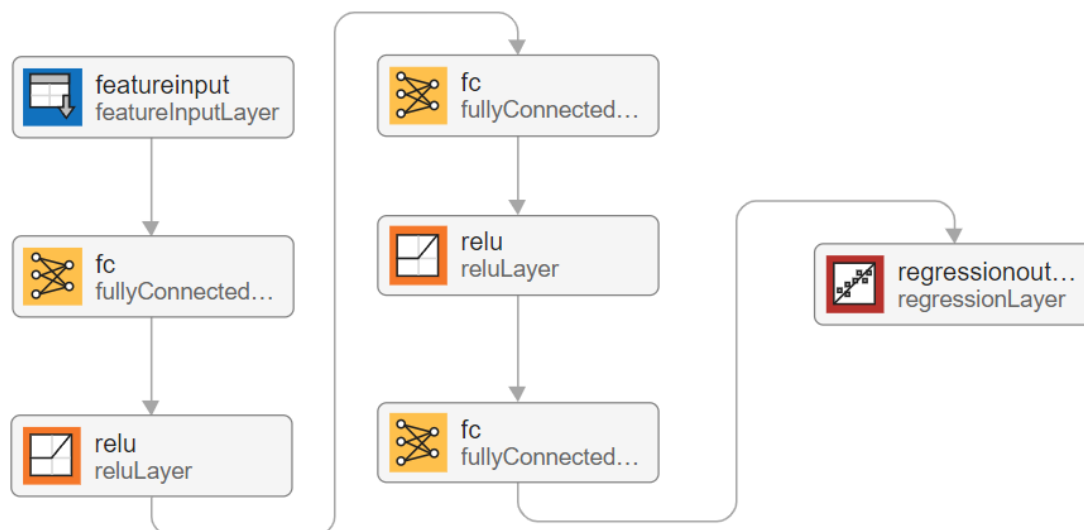
Velikost vstupního datasetu činila 488 provedených SPT zkoušek a 488 tahových zkoušek pro 5 odlišných materiálů – oceli 08Ch18N10T, P92Cu, P91W, 15128 a 10GN2MFA. Dataset byl rozdělen na trénovací (90 % dat) a testovací sadu (10 % dat). Každý z 5 materiálů byl zastoupen v testovací sadě 10 %. Data byly před trénováním normalizovány pomocí zscore. Vstupními parametry neuronové sítě bylo 100 hodnot průběhu síly SPT testu od počátku zatížení až do konce testu. Výstupem algoritmů byl pokaždé jeden materiálový parametr – modul pružnosti v tahu, mez kluzu a mez pevnosti. Každý parametr byl tedy trénován zvlášť. Ke stanovení přesnosti použitého modelu byla stanovena chybovost modelu podle metrik mean squared error (MSE) a mean absolut error (MAE) a průměrnou procentuální chybu predikce proti naměřeným datům tahových zkoušek. Metriky byly počítány pro testovací data.



Obr. 1: Naměřená mez kluzu z tahové zkoušky (modře), predikovaná (žlutě), hodnoty na ose y jsou normované hodnoty Rp02 podle zscore, shluky vyjadřují jednotlivé materiály

Na Obr. 1 je vidět predikce normalizovaných Rp02 trénovacích dat neuronové sítě se dvěma skrytými vrstvami a relu aktivačními funkcemi. Obě skryté vrstvy obsahovaly v tomto případě 10 neuronů. Z Obr. 1 je patrné, že algoritmus s dobrou spolehlivostí rozpozná každý materiál (predikce se příliš neliší od naměřené hodnoty). V Tab. 1 pak lze vidět hodnoty metrik pro

testovací data při použité neuronové síti. Predikci lze ještě vylepšit optimalizací zvolených hyperparametrů. U neuronové sítě se jedná např. o počty neuronů ve skrytých vrstvách, počtu skrytých vrstev nebo typu aktivační funkce.



Obr. 2: Ukázka struktury neuronové sítě se dvěma skrytými vrstvami a relu aktivačními funkcemi

Tab. 1: Hodnoty metrik pro testovací data

	Mean Absolute Error	Mean Squared Error	Průměrná procentuální chyba
	[MPa]		[%]
E	13790	3.53E+08	7.15
R_{p02}	14.85	439.56	3.89
R_m	8.62	164.60	1.44

Závěr

Provedené aktivity potvrdily vysokou přesnost estimace materiálových vlastností z SPT pomocí neuronových sítí, které byly předtím natrénovány s využitím dostupných materiálových databází a provedených zkoušek. Zároveň se ukázalo, že současný rozvoj metod vědy je skutečně značně dynamický (neuronové sítě vytvořené s využitím letošního stavu poznání v oblasti datové vědy jsou významně účinnější než ty, který autoři použili v průběhu předchozích VaV aktivit v roce 2018 [2]). Autoři předpokládají, že na konci aktivit stávajícího projektu, tedy v roce 2024, bude k dispozici ověřená technologie hodnocení klíčových materiálů používaných v jaderné energetice s využitím SPT a umělé inteligence, která bude splňovat veškeré předpoklady pro nasazení v praxi.

Poděkování

Prezentované výsledky výzkumu a vývoje vznikly v rámci projektu TAČR č. TK04020240 Hodnocení materiálových vlastností kovových konstrukčních materiálů používaných v JE metodou SPT a neuronových sítí.

Literatura

- [1] KANDER, Ladislav a POLCAR, Petr. *Determination of the basic mechanical properties of selected materials from the results of small punch tests by using neural networks. Lloyd's Register Quality Assurance*, certifikovaná metodika, 2018
- [2] POLCAR, Petr, KANDER, Ladislav, LAZAR, Jan a KINDELMANN, Petr. Identifikace materiálových vlastností konstrukčních ocelí s využitím umělé inteligence. Sborník z 13. konference „Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“ Srní, 16. – 18. říjen 2018. Západočeská univerzita v Plzni, 2018, s. 75-78. ISBN 978-80-261-0794-1.
- [3] https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/stats/regression-and-anova.html?s_tid=CRUX_lftnav [on-line 27.9.2022]

ANALÝZA TEXTURY MATERIÁLŮ S VYUŽITÍM KONFOKÁLNÍ LASEROVÉ MIKROSKOPIE

TEXTURE ANALYSIS OF MATERIALS USING CONFOCAL LASER MICROSCOPY

Karel Jiříkovský

EVIDENT Europe GmbH (Olympus)

Abstrakt

V současné době rostou stále více nároky na nestandardní způsoby měření velmi jemných součástek, povlaků, spojů, sledování struktur rozličných materiálů a na kontrolu textury, či drsnosti povrchů s vysokou přesností měření. K těmto účelům se s výhodou využívají optická zařízení – konfokální laserové rastrovací mikroskopy, umožňující až submikronové zobrazení povrchů materiálů s nestandardní rozlišovací schopností zobrazení a s možností přesného trojrozměrného měření.

Abstract

Nowadays, there are increasing demands for non-standard ways of measuring very delicate components, coatings, and joints, monitoring the structures of different materials, and checking the texture or surface roughness with high measurement accuracy. For these purposes, optical devices are advantageously used - confocal laser scanning microscopes, allowing up to sub-micron imaging of material surfaces with non-standard imaging resolution and the possibility of accurate three-dimensional measurement.

Konfokální laserová mikroskopie

Konfokální laserový mikroskop, určený pro materiálové aplikace, je představitelem nové generace optických systémů s vysokou přesností 3D zobrazování a měření. Nabízí nové možnosti při vývoji, kontrole rozličných materiálů a součástek. Je zvláště vhodný pro nově vznikající aplikace v mikro a nano-technologických odvětvích, které kladou stále vyšší nároky na nestandardní způsoby bezkontaktního měření a kontrolu materiálů, miniaturních součástek, velmi jemných spojů, litografických hologramů a waferů, a také na kontrolu drsnosti povrchů se submikronovou přesností.



Obr. 1. Konfokální laserový mikroskop (sestava pro kontrolu kvality waferů)

V současné době technologie konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu – Obr. 1, umožňuje zobrazení od přehledového snímku, složeného z více zorných polí dohromady, až

po submikronové zobrazení povrchů materiálů a součástí s nestandardní rozlišovací schopností v laterálním zobrazení až 120 nm a se schopností velmi přesného 3D měření v ose z až 12 nm.

Obvyklý rozsah optického zvětšení od 50x až 17.500x uspokojí požadavky nejen výzkumných a vývojových pracovníků, kteří se při práci pohybují mezi hranicemi optických světelných mikroskopů a elektronových řádkovacích mikroskopů (SEM). Navíc na rozdíl od SEM, popř. AFM (rastrovací mikroskopy na principu měření atomárních sil) se v konfokálním mikroskopu mohou vzorky umisťovat přímo na mikroskopický stolek, bez použití vakuové komory.

Pozorování vzorku probíhá v reálném čase a rovněž není zapotřebí ani tzv. zvodivění povrchu součástí.

Systému lze také velmi dobře využít při analýze vad a poruch, navíc výrazně překračuje rámec konvenční mikroskopie také tím, že představuje velmi výkonný 3D metrologický nástroj s přesností měření (3σ) v laterální rovině x-y v oblasti 120 nm a v ose z až 12 nm.

Další, velmi vhodnou aplikační možností konfokálního laserového mikroskopu je i možnost hodnocení textury rozličných povrchů materiálů, dle mezinárodních norem. Je vhodný jak pro měření lineární drsnosti dle ISO 4287, tak i stále častěji požadované plošné měření drsnosti, dle ISO 25 178.



Obr. 2. Endoprotéza – hodnocení textury povrchu funkčních (kovových) ploch i pasivované části (hydroxiapatit)

Hodnocení povrchů systém provádí bezkontaktně, takže je velmi vhodný i pro hodnocení velmi měkkých a jemných povrchů (např. plasty, CU, Al slitiny), PVD a CVD povlaků, povrchů po laserovém obrábění, dále velmi komplikovaných povrchů a tvarů, např. měkké i tvrdé fáze na povrchu současně (např. zubní frézka – Diamantová zrna ukotvena v kovové matrici).

Pro správné hodnocení povrchu je nutná i příprava hodnoceného povrchu vzorků, tzn. jeho důkladné očištění, před vlastním měřením tak, aby systém nedetekoval současně např. prachové částice, případně otisky prstů atd.

Literatura

- [1] 3D Measuring Laser Microscope, OLS5100, Lext – OLYMPUS Corporation, Shinjuku Monolith, 2-3-1, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-0914, Japan, no. N8601993 - 102020
- [2] Introduction to Surface Roughness Measurement, Roughness measurement guidebook, Measuring Laser Microscope, OLS5100 – OLYMPUS Corporation, Shinjuku Monolith, 2-3-1, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-0914, Japan, no. N8600858-102020
- [3] Instructions, OLS5100, 3D Measuring Laser Microscope, Hardware, OLS5100 – OLYMPUS Corporation, Shinjuku Monolith, 2-3-1, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-0914, Japan, no. AM5124 01, Issued in October 2020

PERSPEKTIVA MALÉHO MODULÁRNÍHO REAKTORU CHLAZENÉHO SUPERKRITICKOU VODOU

PERSPECTIVE OF A SMALL MODULAR REACTOR COOLED BY SUPERCRITICAL WATER

Monika Šípková a Daniela Marušáková

Centrum Výzkumu Řež, s.r.o., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

Abstrakt

Poptávka po energii neustále roste, proto se hledají zdroje, které by ji pokryly i s přihlédnutím na minimální stopu pro životní prostředí. Jednou z možností jsou malé modulární reaktory s maximálním výkonem do 300 MWe. Nastavení požadavků na malý modulární reaktor chlazený superkritickou vodou (SCW-SMR) je hlavním cílem mezinárodního projektu ECC-SMART, na jehož řešení se podílí nejen země Evropské unie, ale také zástupci z Kanady a Číny. Jedním z klíčových úkolů je najít vhodný materiál pro pokrytí paliva, které je v rámci navrhovaného konceptu vystaveno nejnáročnějším provozním podmínkám superkritické vody. Příspěvek bude prezentovat první výsledky a představí výhody a otevřené otázky spojené s budoucností SCW-SMR.

Abstract

The energy demand is constantly growing. Therefore, resources are being sought that would cover it, even taking into account the minimal footprint for the environment. One option is small modular reactors with a maximum output of up to 300 MWe. Setting the requirements for a small modular reactor cooled by supercritical water (SCW-SMR) is the primary goal of the international project ECC-SMART, the solution of which involves not only the countries of the European Union, but also representatives from Canada and China. One of the critical tasks is to find a suitable material for covering the fuel, which is exposed to the most demanding operating conditions of supercritical water within the proposed concept. The paper will present the first results and the advantages and open questions associated with the future of SCW-SMR.

Úvod

Malé modulární reaktory (Small Modular Reactors, SMRs) jsou obecně definovány jako reaktory do výkonu 300 MWe¹. Podle mezinárodní agentury pro atomovou energii (Atomic Energy Agency, IAEA) existuje na 70 konceptů SMR. Nicméně tyto mohou používat různé druhy chladiva a paliv, a liší se i úrovní připravenosti technologie, úrovní připravenosti pro licencování i mírou modularity. Zároveň asi 50 % zmíněných a vyvíjených konceptů spadá do kategorie reaktorů IV. Generace [1], kam patří i malý modulární reaktor chlazený superkritickou vodou, jehož vývoj, a především nastavení požadavků na něj zajišťuje projekt ECC-SMART [2].

Myšlenka využití superkritické vody, resp. páry sahá až do 50. let minulého století. Tlakovodní reaktor s uzavřenou smyčkou primárního okruhu při superkritickém tlaku byl navržen již v roce 1966 [3]. Vzhledem k omezeným výpočetním možnostem v té době, byly tyto myšlenky a plány na čas utlumeny. Lze říci, že renesanci zažívá myšlenka použití superkritické vody pro jaderné technologie na přelomu tisíciletí, kdy je v rámci Evropy rozvíjena především v Německu. Díky podpoře EU tak vznikl projekt HPLWR, HPLWR Phase2 a FQT-SCW [4]. Dalším podpořeným projektem v řadě je zmíněný ECC-SMART.

¹ Konstrukce s výstupním výkonem pod 10 MWe jsou označovány jako mikro-modulární reaktory – micro modular reactors (MMRs).

Projekt je rozdělen na 4 hlavní oblasti se zaměřením na (1) materiálové testování, (2) termo-hydrauliku a bezpečnost, (3) neutronovou fyziku a (4) legislativu.

Cíle a kritéria návrhu SCW-SMR

Základní požadavky na SCW-SMR vycházejí z požadavků na IV. generaci jaderných reaktorů. Jedním z cílů je dosažení efektivity přeměny energie kolem 44 % [5]. Dalším cílem je dosažení nižších provozních nákladů v porovnání s technologiemi na bázi PWR, což by mělo být dáno právě vyšší účinností a zjednodušením technologie, kdy je uvažován jen primární okruh apod. [4]. Vyšší entalpie páry by mohla umožnit přímý, jednorázový parní cyklus, takže by nebyly potřeba ani parní generátory, ani parní separátory a sušičky, a dokonce by bylo možné vynechat čerpadla primárního chladiva. Parní turbíny a přehříváky by navíc mohly být výrazně menší než dnes [3]. Další výhodou je zmenšení velikosti aktivní zóny, což se promítne do požadavků na palivo, např. na jeho obohacení při dosažení cílové délky provozního cyklu (vyhoření paliva).

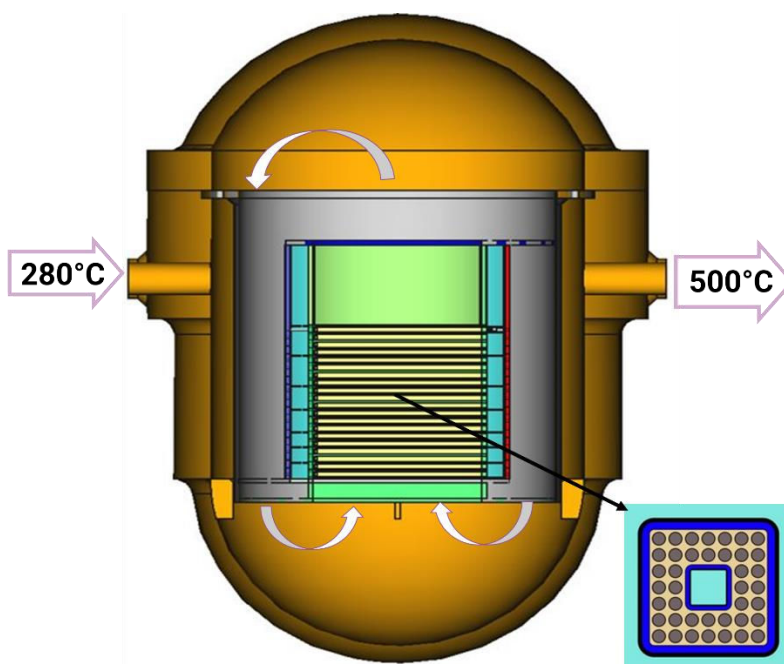
Návrh reaktoru počítá i s vysokým důrazem na bezpečnost, která bude mimo jiné podpořena pasivními bezpečnostními systémy, které fungují výhradně na základě fyzikálních jevů. Dalším požadavkem je možnost odvodu zbytkového tepla nezávisle na vnějším zdroji energie, a to v časovém intervalu 3 dnů (tady samo-uchlazení reaktoru).

Moderátorem a chladivem bude superkritická voda (SCW), u níž nebude docházet k fázové přeměně i přes velké změny teploty a hustoty. Právě významná změna hustoty SCW bude využita pro moderaci štěpné reakce. Předností SCW–SMR je jeho nulová toxicita, a i z hlediska bezpečnosti provozu, např. v případě úniku primárního chladiva či mimořádné události, převyšuje technologie využívající ke chlazení tekuté soli či kovy (např. olovo-bismut, sodík).

Pokrok SCW-SMR v rámci ECC-SMART

V rámci testování materiálů je pozornost věnována pokrytí paliva, kdy nelze vzhledem k vysokým pracovním parametrům použít zirkoniové slitiny, jak je běžné u vodou chlazených reaktorů stávající generace. Na začátku projektu tak byla vytvořena testovací matrice obsahující více než 700 vzorků. Na základě výsledků předchozích výzkumných prací zaměřených na korozní odolnost strukturních materiálů v prostředí SCW, byly vybrány austenitická ocel 310S a niklová slitina 800H. Pro kompletnost testů a podporu mezinárodní spolupráce byl kolegy z Číny dodán experimentální materiál – AFA (Alumina Forming Austenitic slitin). Jedná se o austenitickou ocel o složení blízké 310S s vyšším obsahem Al, který by měl vést k lepší korozní odolnosti v prostředí SCW. Většina výše zmíněných testovaných vzorků byla vyrobena z trubek, aby se výsledky/výzkum více přiblížil reálným podmínkám, jelikož korozní odolnost pokrytí paliva byla označena jako klíčovou pro další vývoj reaktorů chlazených SCW. Podmínky zkoušek vycházely z výpočtů a zkušeností kolegů z Kanady. Expoziční testy, včetně těch zaměřených na elektrochemii, byly zahájeny a první výsledky se aktuálně vyhodnocují. Kromě vlivu prostředí SCW na korozní odolnost vybraných materiálů, bude věnována pozornost také radiolýze vody a vlivu ozáření neutrony na jejich chování.

Další pracovní balíček je zaměřen na termohydrauliku, bezpečnost a taky konstrukční návrh SCW-SMR, který je ukázán na Obr.. Tento inovativní návrh vychází z předchozího návrhu vysoko-výkonného lehkovodního reaktoru (High Performance Light Water Reactor, HPLWR [3]) a promítnutí zkušeností od kolegů z Kanady a Číny. Uvedený návrh počítá s horizontálním umístěním palivových souborů. Jedním z cílů toho pracovního balíčku je zahrnutí/promítnutí vlivu stavu povrchu pokrytí paliva na přestup tepla.



Obr. 1: Výchozí návrh reaktoru SCW-SMR [6] včetně průřezu palivovým článkem, jehož optimalizace je jedním z klíčových aktivit projektu ECC-SMART.

Další pracovní skupina se zabývá optimalizací palivových souborů a jádra z pohledu neutronů. Jedním z hlavních cílů je dosáhnout 2letého cyklu vyhoření paliva. Za tímto účelem byl upraven návrh palivových souborů včetně geometrie a počtu palivových proutků. Do návrhu palivových souborů se promítá i typ (UO_2 a MOX) a obohacení paliva. První výsledky ukázaly, že palivo MOX lze úspěšně použít v kombinaci s vyšším obohacením UO_2 . Plánují se však další analýzy pro dosažení vhodného rozvržení jádra. Ne všechny změny navrhované na základě neutronové fyziky jsou však proveditelné z hlediska termo-hydrauliky a materiálů. Základní parametry SCW-SMR jsou shrnuty v Tab. 5 a jsou předmětem optimalizace v rámci zmíněného projektu ECC-SMART.

Tab. 5: Vybrané základní parametry konceptu SCW-SMR [7].

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	300	MWe
Chladivo	Superkritická voda	
Vstupní teplota	280	°C
Výstupní teplota	500	°C
Maximální teplota na pokrytí paliva	570	°C
Průměrná teplota chladiva	380	°C
Pracovní tlak	25	MPa
Palivo	UO_2 , MOX	–
Vyhoření paliva	720	den

Výstupy a pokrok dosažený v technických pracovních skupinách by měl vést k návrhu shrnující hlavní požadavky související se zajištěním bezpečnosti provozu SCW-SMR. Vzájemná spolupráce v rámci řešení projektu by také měla pomoci sestavit požadavky na budoucí licenční proces, čemuž se věnuje další vyčleněná pracovní skupina.

Závěr

Obecně lze říci, že malé modulární reaktory se jeví jako vhodný a možný způsob pro zajištění dodávek energie v budoucnu, kdy se převážně mluví o jejich využití při nahrazování elektráren na fosilní paliva. V případě konceptů orientovaných na budoucí generaci IV. je však ještě potřeba ujit kus cesty před uvedením do praxe. V prezentovaném případě patří mezi klíčové výzkumné aktivity především nalezení vhodného materiálu pro pokrytí paliva, u kterého by byla zachována vysoká pevnost při dlouhodobém vystavení vysokým provozním teplotám a tlakům a vysoká korozní odolnost. Zároveň by tento materiál měl obsahovat co nejméně prvků s velkým účinným průřezem pro zachyt neutronů. Z pohledu bezpečnosti a konstrukce bude nutné věnovat ještě mnoho úsilí k navržení a umístění regulačních tyčí v rámci plánovaného konceptu SCW-SMR s horizontálně instalovanými palivovými články. Tím pádem bude nutné více optimalizovat velikost a počet palivových článků, včetně jejich originální geometrie. V neposlední řadě je předmětem diskuze výměna vyhořelého paliva a nastavení cílené modularity systému na bázi SCW.

Na závěr je však nutné znovu zmínit výhody konceptů SMR, ke kterým patří především předpokládané nižší počáteční investiční náklady (včetně časové náročnosti), modularita, předpokládaný jednodušší provoz a vysoký důraz na bezpečnost provozu. Koncept SCW-SMR se navíc opírá o bohaté zkušenosti z provozů lehkovodních reaktorů po celém světě.

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] IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, Austria, 2020.
- [2] <https://ecc-smart.eu/>
- [3] T. SCHULENBERG, J. STAFINGER, *HPLWR-Design and Analysis*, Germany, 2014
- [4] M. KRYKOVÁ, M. ARNOULT RŮŽIČKOVÁ, M. ŠÍPOVÁ, *Vývoj superkritickou vodou chlazeného reaktoru v Evropě*, Jad. Energ. 3 (2021) 42–49.
- [5] K. UCHIMURA, A. YAMAJI, *Preliminary Core Design Study of Small Supercritical Fast Reactor with Single-Pass Cooling*, J. Nucl. Eng. 1 (2020) 46–53. <https://doi.org/10.3390/jne1010004>.
- [6] T. SCHULENBERG, O. IVAN, *Suggestion for design of a small modular SCWR*, Conf. Proc. ISSCWR-10. (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4052191>.
- [7] T. SCHULENBERG, I. OTIC, *Concept of a small modular SCWR with horizontal fuel assemblies*, ASME J. Nucl. Rad Sci. 8 (2022). <https://doi.org/10.1115/1.4052191>.

OVĚŘENÍ ODHADU DLOUHODOBÝCH CREEPOVÝCH VLASTNOSTÍ 9-12 %CR OCELÍ V KRATŠÍM ČASOVÉM INTERVALU

VERIFICATION OF ESTIMATION OF LONG-TERM CREEP PROPERTIES OF 9-12%CR STEEL IN A SHORTER TIME INTERVAL

Tomáš Vlasák ^{a)}, Šárka Neumannová ^{a) b)} a Jan Čech ^{b)}

^{a)} SVÚM a.s., Tovární 2053, 250 88 Čelákovice

^{b)} ŽĐAS a.s., Strojírenská 6, 591 71 Žďár nad Sázavou

Abstrakt

Na žárupevných 9-12 %Cr ocelích byla ověřována závislosti doby do lomu na teplotě, přičemž napětí bylo shodné při všech zkouškách. Zvolené oceli se v současné době stále více používají, a to především v energetice, kde jsou využity jejich dobré mechanické vlastnosti při vysokých teplotách. Na základě takto získaných dat lze z krátkých creepových zkoušek spolehlivěji odhadnout doby do lomu u řádově delších zkoušek, které jsou požadovány při přejímacích podmínkách. Výsledky byly získány při spolupráci společností SVÚM a.s. a ŽĐAS a.s. za podpory TA ČR.

Abstract

The dependence of time to fracture on temperature was verified on high temperature 9-12 %Cr steels, while the stress was the same in all tests. These steels are currently used in the energy industry, where their good mechanical properties at high temperatures are utilized. Based on the obtained data, the times to fracture can be more reliably estimated from short creep tests for much longer tests, which are required under acceptance conditions. The results were obtained in cooperation with SVÚM a.s. and ŽĐAS a.s. with the support of TA ČR.

Úvod

Odhad dlouhodobých creepových vlastností byl ověřován na materiálu X10CrWMoVNB92 (P92). Tato práce navazuje na výsledky projektu TG03010032-31-1 [1], ve kterém se na této oceli testoval vliv stupně prokování na dlouhodobé creepové chování.

Cílem experimentů bylo navrhnout takové podmínky creepových zkoušek, při jejichž splnění by bylo možné tvrdit, že materiál dosáhne při teplotě 635 °C a zatížení 120 MPa dobu do lomu 1 000 hodin.

Experimentální materiál

Experimentální tavba, jejíž chemické složení je uvedeno v Tab. 1, i zkušební výkovek stupňovitého hřídele (Obr.1.) byl vyroben v ŽĐAS, a.s. Stupeň prokování výkovku byl 11-24 v závislosti na dosaženém průměru, v tomto příspěvku se zabýváme výsledky ze stupně prokování 15,7 (přibližně střed zkušebního výkovku), vzorky odebrány z ¼ T průměru hřídele 310 mm.

Výkovek po dokování řízeně ochlazen a následovalo tepelné zpracování 1065 °C/olej +750 °C/vzduch. Pro ověření odhadu creepových vlastností krátkodobých zkoušek byl použit materiál se stupněm prokování 15,7.



Obr. 1 – Stupňovitý hřidel

Jeho creepové vlastnosti byly sledovány v předchozím projektu při napětích od 170 MPa do 80 MPa a teplotách 600, 625 a 650°C. Při každé teplotě bylo provedeno 5 zkoušek s různým napětím, tak aby nejkratší doby do lomu byly přibližně 100 h a zkoušky při nejnižších napětích trvaly více než 10 000 hodin. U nejdelší zkoušky přesáhla doba do lomu 31 000 hodin. Výsledky zkoušek byly vyhodnoceny pomocí Larson – Millerova parametru P_{LM} [3], podle regresního modelu

$$\log \sigma = A_1 + A_2 P_{LM} + A_3 P_{LM}^2,$$

kde $P_{LM} = T \cdot (\log t_r + A_4)$,

σ je napětí [MPa],

T je teplota [K],

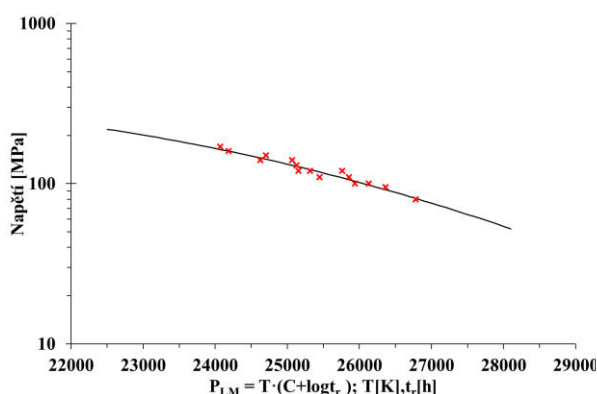
t_r je doba do lomu [h],

$A_1 - A_4$ jsou materiálové konstanty A_4 byly zvolena 25.

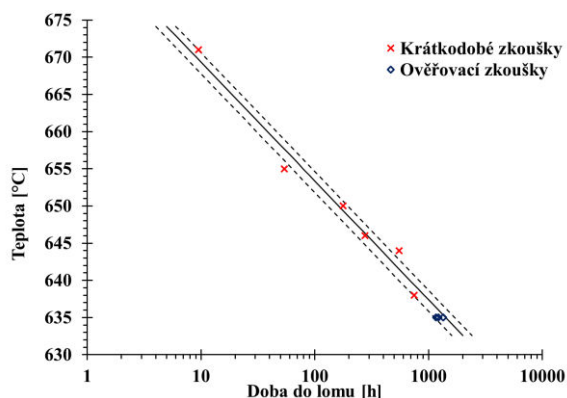
Závislost napětí na Larson – Millerově parametru je zobrazena na Obr. 2. [1]

Tab. 1. Chemické složení oceli P92 [hm. %] [2]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb	Al	N
min	0,07	0,3				8,5		0,3	0,15	1,5	0,04		0,03
max	0,13	0,6	0,5	0,02	0,01	9,5	0,4	0,6	0,25	2	0,09	0,04	0,07
57448	0,1	0,47	0,22	0,017	0,002	8,9	0,4	0,58	0,2	1,71	0,068	0,005	0,0476



Obr. 2 Výsledky creepových zkoušek mat. X10CrWMoVNb92 (P92)



Obr. 3 Výsledky ukončených zkoušek mat. X10CrWMoVNb92 (P92) při konstantním napětí 120MPa

Výsledky

V první fázi výzkumu byly na materiálu X10CrWMoVNB92 provedeny krátkodobé creepové zkoušky při teplotách od 638 do 671 °C a zatížení 120 MPa. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v Tab. 2. Grafická interpretace lineární závislosti doby do lomu na teplotě je uvedena na Obr. 3.

Tab. 2 Výsledky creepových zkoušek mat. X10CrWMoVNB92 při zatížení 120 MPa

Podmínky		Doba do lomu [h]
Teplota [°C]	Napětí [MPa]	
671	120	9,50
655	120	54,00
650	120	177,25
646	120	277,00
644	120	551,75
638	120	749,00

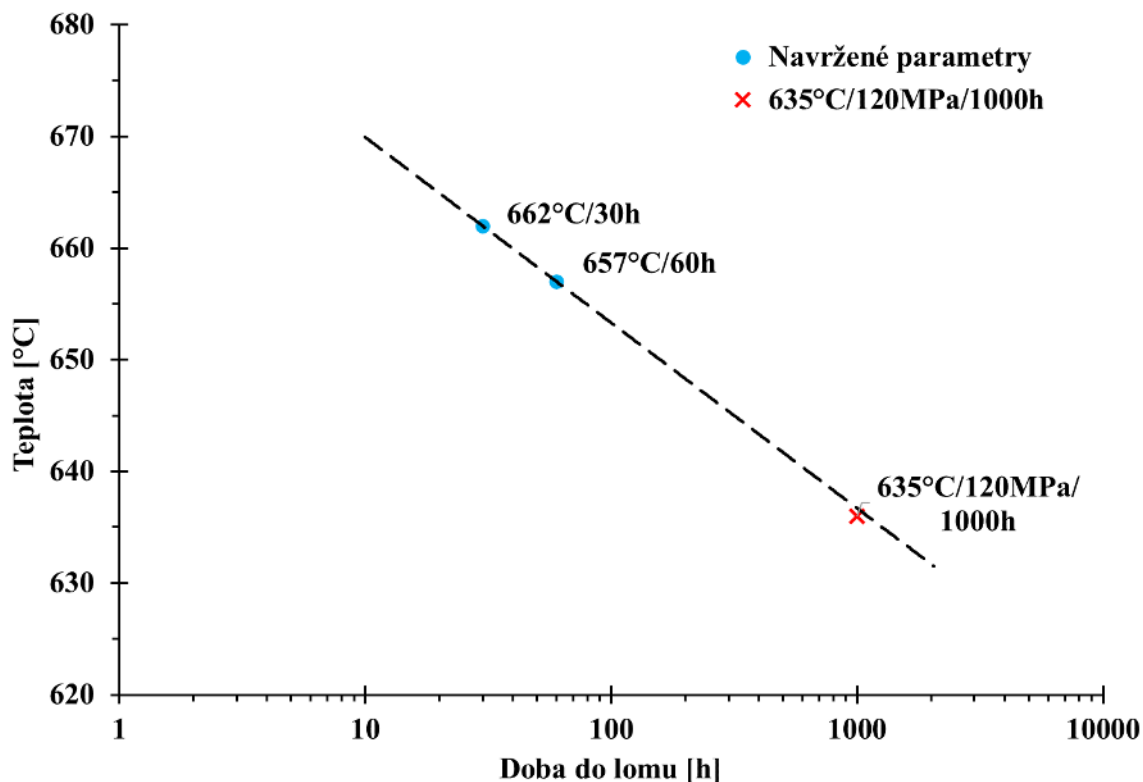
Na základě výsledků krátkodobých zkoušek byly navrženy podmínky ověřovacích zkoušek, tak aby doba do lomu byla přibližně 1 000 hodin. Teplota zkoušek byla při zatížení 120 MPa 635°C. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky ověřovacích zkoušek mat. X10CrWMoVNB92 při zatížení 120 MPa

Podmínky		Doba do lomu [h]
Teplota [°C]	Napětí [MPa]	
635	120	1 347,00
635	120	1 226,25
635	120	1 161,25

Závěr

Z výsledků creepových experimentů na materiálu X10CrWMoVNB92 (P92) byla vyhodnocena závislost a zvoleny podmínky 2 zkoušek – 662 °C/120 MPa/30 h a 657 °C/120 MPa/60 h. Pokud bude materiál při těchto krátkodobých zkouškách vyhovující, lze u něj předpokládat životnost 1 000 hodin při 635 °C a 120 MPa, viz Obr. 4.



Obr. 4 Návrh krátkodobých zkoušek pro odhad doby do lomu 1 000h

Literatura

- [1] NEUMANOVÁ, Š. – VLASÁK, T.: *Studium vlivu stupně prokování na vlastnosti ocele X10CrWMoVNB92*. Závěrečná zpráva SVÚM a.s. TG03010032-31-1/6; 2019.
- [2] ASTM A335/A335M-11; Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service; 2013.
- [3] SEIFERT, W. - MELZER, B.: Rechnerische Auswertung von Zeitstandversuchen am Beispiel des Stahles 13CrMo4-4.15. Vortragveranstaltung „Langezeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, Düsseldorf, 06.11.1992.

POROVNÁNÍ AUSTENITICKÝCH PŘEHŘÍVÁKOVÝCH OCELÍ PO ŠESTILETÉ EXPOZICI V PROSTŘEDÍ SPALIN

COMPARISON OF AUSTENITIC SUPERHEATER STEELS AFTER 6 YEARS EXPOSURE IN FLUE GAS ATMOSPHERE

Marie Ohanková ^{a)}, Irena Andršová ^{a)}, Petr Král ^{b)}, Lucie Pilsová ^{a,c)}, Václav Bouček ^{a,d)},
Ladislav Horváth ^{a)}, Tomáš Chmela ^{a)} a Josef Čmakal ^{a)}

^{a)} UJP PRAHA a.s.

^{b)} ÚFM AV ČR, v.v.i.

^{c)} ÚMI FS ČVUT v Praze

^{d)} KMAT FJFI ČVUT v Praze

Abstrakt

Svarové spoje tří austenitických přehřívákových ocelí (SUPER 304H, HR3C a TP347H FG) byly vystaveny šestileté expozici v reálném přehříváku uhelného kotle s kontinuálním záznamem teploty. Po vyjmutí z přehříváku byly svarové spoje podrobeny materiálovému rozboru zahrnujícímu mechanické zkoušky (zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, měření tvrdosti) a metalografické analýzy pomocí světelné a elektronové mikroskopie. Získané výsledky byly hodnoceny především z hlediska působení proměnné teploty v intervalu mezi 500 °C až 650 °C a korozního prostředí spalin. Zároveň bylo provedeno vzájemné porovnání teplotní a korozní odolnosti zvolených tří přehřívákových ocelí.

Abstract

Welded joints of three austenitic superheater steels (SUPER 304H, HR3C and TP347H FG) were subjected to six years of exposure in a real coal boiler superheater, while the temperature of joints was continuously recording. After removal from the superheater, the welded joints were subjected to material analysis including mechanical tests (tensile test, bending impact test, hardness measurement) and metallographic analysis using light and electron microscopy. The obtained results were evaluated mainly in terms of the effect of variable temperature in the interval between 500 °C and 650 °C and of the corrosive environment of the flue gas. At the same time, a mutual comparison of the thermal and corrosion resistance of the three superheater steels selected was made.

Úvod

Vzorky homogenních svarových spojů přehřívákových trubek o rozměrech Ø 38 x 6,3 mm a délce 270 mm, vyrobených z austenitických ocelí SUPER 304H, HR3C a TP347HFG, byly volně zavěšeny do prostoru přehříváku hnědohuholedného fluidního kotle. Tím byly celé vystaveny přímé teplotě a koroznímu působení spalin, tj. bez vnitřního přetlaku a bez chlazení vnitřního povrchu proudící párou. Během šestiletého provozu kotle pak byla na těchto vzorcích kontinuálně měřena teplota a zároveň byly zjišťovány počty odstávek. Následným zpracováním dat byly zjištěny skutečné parametry provozní expozice svarových spojů:

- provozní teplota spalin (568 ± 24) °C
- počet odstávek 67
- provozní hodiny za 6 let provozu 31 546 h

Austenitické přehřívákové trubky byly vyrobeny společností Sumitomo Metal Industries s chemickým složením, uvedeným v tab. 1. Všechny trubky byly dodány ve stavu po rozpouštěcím žihání. Homogenní svarové spoje (celkem 12) pak byly vyrobeny automatickou orbitální hlavou metodou TIG na tři vrstvy, bez předeřevu a s interpass teplotou max. 150 °C s rozdílnými přídatnými materiály, viz tab. 1. Polovina svarů byla po svaření

tepelně zpracována (PWHT) rozpouštěcím žíháním. Přehled tepelného zpracování výchozích ocelí (TZ) a svarových spojů včetně volby přídatného materiálu je zde:

- SUPER 304H (4x svar) – TZ 1150 °C/2 min/voda, 2x PWHT 1130 °C/15 min/voda, Thermanit 304HCu
- HR3C (4x svar) – TZ 1250 °C/2 min/voda, 2x PWHT 1230 °C/15 min/voda, Thermanit 617
- TP347HFG (4x svar) – TZ 1190 °C/2 min/voda, 2x PWHT 1170 °C/15 min/voda, UTP A 6170 Co

Tab. 1: Chemické složení posuzovaných materiálů (v hm. %), pozn.: Fe zbytek, *Nb+Ta

Materiál	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	Co B	Al	N Ti	Cu	P	S
SUPER 304H	0,08	0,25	0,81	18,3	9,0	0,49		B 0,004	0,005	N 0,11	3,07	0,030	0,000
HR3C	0,06	0,41	1,19	24,9	19,9	0,44				N 0,26		0,016	0,000
TP347H FG	0,09	0,37	1,54	18,2	11,5	0,89*						0,022	0,001
Thermanit 304 HCu	0,10	0,38	3,33	18,0	15,7	0,45	0,67			N 0,19	3,05	0,002	0,001
Thermanit 617	0,06	0,05	0,01	22,3	55,2		8,92	Co 10,74	1,190	Ti 0,31	0,001	0,003	0,002
UTP A 6170 Co	0,05	0,09	0,05	22,0	55,8		8,78	Co 10,77	1,270	Ti 0,30	0,01	0,003	0,002

Po vyjmutí z přehříváku byly zkušební vzorky rozřezány na segmenty pro destruktivní mechanické zkoušky a pro mikrostrukturní rozbor světelnou a elektronovou mikroskopií. Pro porovnání jsou v následujícím textu uvedeny i výsledky rozborů mechanických a mikrostrukturních vlastností výchozích stavů homogenních svarových spojů, provedených během let 2012 až 2014 ve zprávách [1,2].

Výsledky mechanických zkoušek

Z výchozích i exponovaných svarových spojů byla odebrána tělesa pro zkoušky tahem i rázem nejen přes svarový spoj, ale také z obou základních materiálů.

Zkouška tahem za pokojové teploty

Tělesa pro zkoušku tahem měla podobu krátkých (celková délka 62 mm) závitových (neúplný závit M8) válcových tyčí s dřikem o průměru 5 mm a délce 30 mm. Všechny zkoušky pak byly provedeny konstantní rychlostí 0,5 mm/min trhacím strojem Instron 1185R5900. Získané výsledky shrnuje následující tab. 2.

Tab. 2: Výsledky zkoušky tahem za pokojové teploty (VS – výchozí stavy, exp. – stavy po expozici v přehříváku)

Materiál	SUPER 304H - ZM		SUPER 304H - svar		HR3C - ZM		HR3C - svar		TP347HFG - ZM		TP347HFG - svar	
	VS [1,2]	exp.	VS [1,2]	exp.	VS [1,2]	exp.	VS [1,2]	exp.	VS [1,2]	exp.	VS [1,2]	exp.
Rp0,2 [MPa]	310 ± 35	373 ± 8			344 ± 30	381 ± 1			279 ± 3	310 ± 6		
Rm [MPa]	666 ± 16	739 ± 6	633 ± 10	623 ± 8	779 ± 6	776 ± 5	760 ± 15	782 ± 9	604 ± 2	666 ± 2	600 ± 5	670 ± 2
A5 [%]	54 ± 4	52 ± 2			55 ± 1	40 ± 1			52 ± 1	59 ± 2		
Z [%]	76 ± 1	69,7 ± 0,3			72 ± 2	34 ± 1				69 ± 1		
místo lomu			SK	SK			SK	TOO			TOO	TOO

Z tab. 2 je patrné, že dlouhodobou expozicí na teplotě mezi (544 až 592) °C došlo ke zpevnění především ocelí SUPER 304H a TP347HFG, které jsou obě jemnozrnné a stejného

typu 18Cr-10Ni. U oceli HR3C (hrubozrnná, typ 25Cr-20Ni) není toto zpevnění nijak výrazné, zato je doprovázeno strmým pádem tažnosti základního materiálu (ZM) a přesunem místa lomu ze svarového kovu (SK) do tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Lomové plochy přitom změnily mechanismus lomu z transkrystalického na interkrystalický.

Zkouška rázem v ohybu

Pro zkoušku rázem v ohybu byla vyrobena redukovaná Charpyho tělesa o rozměrech 10 x 5 x 55 mm s V vrubem, umístěným jak v základních materiálech, tak v tepelně ovlivněných oblastech a svarových kovech v korunové části, tj. VH(W)T a/1. Všechna tělesa pak byla přerážena při teplotě 20 °C pomocí kladiva VEB WPM 300J a lomové plochy byly prohlédnuty pomocí stereomikroskopu Leica M205C. Získané výsledky ukazuje tab. 3. Z ní vyplývá, že u všech ocelí došlo během expozice v přehříváku ke snížení houževnatosti všech částí svarového spoje, nicméně obě oceli typu 18Cr-10Ni (SUPER 304H a TP347HFG) si v základním materiálu zachovaly transkrystalický charakter lomu, zatímco ocel HR3C a všechny tepelně ovlivněné oblasti a svarové kovy vykazují buď úplný (ocel HR3C všude, ostatní jen v SK), nebo částečný podíl interkrystalického lomu. Požadavek minimální hodnoty 20 J (redukované těleso 10x5 mm) tak po provozní expozici jistě nesplňují svarové kovy ocelí SUPER 304H a TP347HFG a prakticky celý svarový spoj oceli HR3C.

Tab. 3: Výsledky zkoušky rázem v ohybu, měření tvrdosti a velikosti zrna

Výsledek	Materiál	SUPER 304H		HR3C		TP347HFG	
	umístění	VS	exp.	VS	exp.	VS	exp.
KV [J]	ZM	60 ± 2	46 ± 4	80 ± 2	8 ± 2	53 ± 2	48 ± 1
	TOO	92 ± 1	35 ± 9	94 ± 1	12 ± 3	85 ± 12	42 ± 3
	SK	57 ± 5	14 ± 1	79 ± 12	21 ± 1	80 ± 10	13 ± 1
HV	ZM	176 ± 8	198 ± 7	180 ± 3	196 ± 13	154 ± 1	171 ± 7
	TOO	176 ± 9	197 ± 5	179 ± 11	195 ± 7	161 ± 13	176 ± 14
	SK	166 ± 11	180 ± 6	178 ± 7	236 ± 4	162 ± 7	242 ± 8
velikost zrna (G)	ZM	7,5-8	(00-2,5) 4-6 8,5-9,5	3-4	(0) 2-5	7-9	(5) 8-9
	TOO	(-1) 3,5-8	(00-2,5) 4-4,5	1-4	(0) 2-5	3-7	4-6,5

Měření tvrdosti

Zkoušky tahem a rázem byly doplněny o měření Vickersovy tvrdosti přes svarové spoje (na metalografickém výbrusu) zatížením HV10 pomocí tvrdoměru ZWICK ZHU250. Umístění vtisků bylo rozděleno na základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Získané výsledky jsou opět shrnuty v tab. 3. Jak je vidět u exponovaných stavů, provozní expozice vedla ke znatelnému navýšení tvrdosti u všech částí svarových spojů ocelí SUPER 304H a TP347HFG. Zatímco u oceli HR3C vykazuje výrazné navýšení pouze svarový kov, protože tvrdosti jejího základního materiálu a tepelně ovlivněných oblastí mají velký rozptyl. Toto zjištění potvrzuje závěry ze zkoušek tahem.

Výsledky mikrostrukturního rozboru

Z výchozích i exponovaných svarových spojů byly vyrobeny metalografické výbrusy standardními postupy (zalitím, mechanickým broušením, leštěním a elektrolytickým leptáním v kyselině šťavelové), na niž byla hodnocena mikrostruktura včetně korozního napadení obou povrchů. Z exponovaných základních materiálů pak byly navíc připraveny tenké fólie (elektrolytickým odleptáváním) pro identifikaci fází pomocí TEM difrakce a EDS analýzy.

Světelná mikroskopie

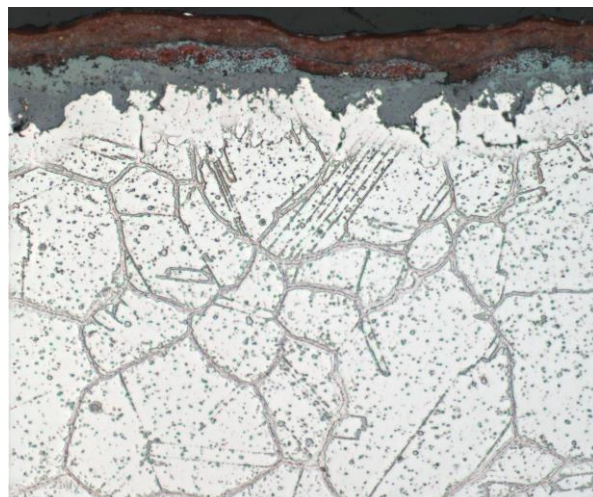
Rozbor mikrostruktury byl proveden pomocí světelného mikroskopu NIKON MA200.

Vlivem dlouhodobé teplotní expozici došlo u všech ocelí buď k lokálnímu hrubnutí velikosti zrna (viz hodnoty uvedené v závorkách v tab. 3) především na vnějším povrchu trubek, nebo k rozšíření již od svařování zhrublé části tepelně ovlivněné oblasti spoje na vnitřním povrchu. V těchto oblastech pak docházelo k interkrystalickému koroznímu napadení (viz obr. 1) do hloubky maximálně 1 mm. Dále docházelo k celoplošné tvorbě oxidické vrstvy (do tloušťky 100 μm) na obou površích, i pod ulpívající vrstvou spalín (horní červená na obr. 2). Markantní byla též mohutná sekundární precipitace v oceli HR3C.



EOP 3-49-S TOO Lc3

Obr. 1: Napadení vnitřního povrchu TOO svarového spoje oceli SUPER 304H



7-2-3 R Le1

Obr. 2: Vnější povrch základního materiálu svarového spoje oceli HR3C

Elektronová mikroskopie

Identifikace fází v základních materiálech byla provedena pomocí elektronového mikroskopu JEM-2100F TEM/STEM vybaveného EDS detektorem Oxford X-Max 80T. Ve všech ocelích byly pozorovány karbidy M_{23}C_6 (především na hranicích zrn oceli HR3C). V matici ocelí typu 18Cr-10Ni se dále nachází fáze NbC/NbN, $\text{Nb}_3\text{Fe}_3\text{C}$ a v oceli SUPER 304H jsou dispergovány částice Cu o velikosti maximálně 20 μm . Ocel HR3C navíc obsahuje Z-fázi, jejíž výskyt nelze vyloučit ani u oceli SUPER 304H v okolí Nb nitridu. V žádné oceli nebyla identifikována sigma fáze.

Závěr

Z porovnání zkoušených ocelí vyplývá, že dlouhodobá (beznapěťová) expozice svarových spojů způsobila zpevnění ocelí 18Cr-10Ni a zkrhutnutí oceli HR3C a všech svarových kovů, což vyvolala precipitace karbidů M_{23}C_6 na hranicích zrn. Zbytková vnitřní pnutí u svarů oceli SUPER 304H způsobila interkrystalickou korozi v hrubozrnné oblasti na vnitřním povrchu.

Poděkování

Příspěvek vznikl během řešení projektu FV40166 v rámci programu TRIO za finanční podpory MPO ČR.

Literatura

- [1] HERMANOVÁ, Šárka, KOCOUREK, Jiří. *Shrnutí výsledků mechanických a metalografických zkoušek kvalifikačních svarových spojů*. Projekt FR-TI3/458. Ostrava, leden 2012, technická zpráva, TZ-804.6-009, rev. 1.
- [2] DOUDA, Jindřich, HORVÁTH, Ladislav, PŘIBYL, Antonín. *Experimentální ověřování svarových spojů ocelí Super 304H, HR3C, TP347H FG a P92. Program MPO TIP. Materiálové řešení průmyslových zařízení pracujících s ultrapřehřátou parou*. Praha, září 2014, výzkumná zpráva, UJP 1618.

KONTROLY ZÁVITOVÝCH HNÍZD NÁTRUBKŮ HRK JE DUKOVANY

INSPECTIONS OF THE THREADED NESTS OF HRK NPP DUKOVANY NOZZLES

Pavel Zahrádka a Zdeněk Fulín

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Přírubové spoje nátrubků havarijní regulační kazety (HRK) jsou možným zdrojem porušení těsnosti u jaderného reaktoru. Závitová hnízda a svorníky přírub mohou vykazovat za dobu provozu mechanické i korozní poškození, které je nutné sledovat a detailně vyhodnocovat. Pracovníky CVŘ byla realizována nová technika inspekce povrchu závitových hnízd a svorníků HRK na JE Dukovany. Klasická metoda kontroly závitových hnízd používá nepřímou vizuální kontrolu pomocí videoskopu. Nově se využívá metoda odběru replik, která dokáže nedestruktivně detekovat a následně i změřit poškození závitových částí jmenovaných komponent v řádu mikronů, a to po celé ploše závitu.

Výhodou replik oproti stávající nepřímé vizuální kontrole je možnost následně provést jejich přesné 3D skenování, čímž významně narůstá přesnost vyhodnocení nalezených vad a poškození s přesným určením jejich velikosti, tvaru a polohy. Současně lze repliky uchovávat pro pozdější srovnání z pohledu rozvoje provozního poškození.

Abstract

The flange joints of the emergency control cassette (HRK) nozzles are a possible source of leakage in a nuclear reactor. Threaded sockets and flange bolts may show mechanical and corrosion damage during operation, which must be monitored and evaluated in detail. CVŘ employees implemented a new technique for inspecting the surface of threaded sockets and HRK bolts at the Dukovany NPP. The classic method of inspecting threaded nests uses indirect visual inspection using a videoscope. A new way of taking replicas is used, which can non-destructively detect and subsequently measure damage to the threaded parts of the named components in the order of microns, namely the entire surface of the thread.

Compared to existing indirect visual inspection, the advantage of replicas is the possibility of their subsequent accurate 3D scanning, which significantly increases the accuracy of the evaluation of found defects and damage with the precise determination of their size, shape, and position. At the same time, replicas can be kept for later comparison from the point of view of operational damage development.

Úvod

U závitů se vyskytují defekty způsobené jednak mechanickým poškozením, ale i korozním napadením. Povrch je velmi tvarově složitý a v případě potřeby vyhodnocení rozměrů je jejich stanovení velmi komplikované. Ještě komplikovanější je hodnocení defektů u vnitřních závitů, kde je omezena přístupnost k povrchu a měření je nutné provádět v místě zařízení.

Jedním z hodnocených míst, kde vznikl požadavek na posouzení stavu povrchu svorníků a závitových hnízd, byly přírubové spoje nátrubků havarijní regulační kazety na víku reaktoru elektrárny Dukovany. V případě závitových hnízd je jednou z mála použitelných metod měření nepřímou vizuální metodou pomocí videoskopu s funkcí stereoskopického měření. Toto měření je však omezené mnoha faktory, a to odlesky povrchu, měřená plocha by měla být kolmá k ose skeneru, což dokonce i u vnějších závitů bývá problém. Přesnosti těchto systémů se pohybují na úrovni desetin milimetru při optimálních podmínkách.

Při použití replikační hmoty je možné zachytit všechny povrchové defekty ve vybrané oblasti a zachytit jejich tvar s přesností až $0,1\ \mu\text{m}$. Tuto repliku je navíc možné podrobit v laboratoři analýze pod mikroskopem a vzorky snadno dále uchovávat, pokud nedojde k jejich kontaminaci během odbírání. Společnost Centrum výzkumu Řež však navíc disponuje i zařízením pro práci s kontaminovanými vzorky, a i tyto repliky by bylo možné pomocí optického profilometru analyzovat.

K tvorbě repliky je však nutné splnit základní požadavky, aby výsledky dosáhly požadovaných přesností. Základem je čistota povrchu, výběr vhodné hmoty, vymezení prostoru odlitku a důležitý je i samotný proces plnění. Právě procesu odběru a vymezení odběrového prostoru se intenzivně věnujeme a v posledním roce jsme si osvojili metody přípravy přesných šablon a forem pomocí 3D tisku.

Použité vybavení

K odběru replik používáme hmoty od společnosti Struers. Jde o dvousložkové hmoty tvrdnoucí stejně na vzduchu jakož i bez přístupu vzduchu, i pod vodou s obsahem kyseliny borité. Jejich aplikace je snadná pomocí dávkovací pistole či speciálního manipulátoru, který je v současné době vyvíjen pro aplikace pod vodou.

Tyto hmoty nanášíme do přípravků (forem), které navrhujeme vždy pro konkrétní aplikaci. V případě svorníků replikační hmotu odléváme do vaniček, které obsahují ve spodní části nálitek, kanálky pro optimální rozlévání hmoty a drážky pro zafixování hmoty ve formičce při vyjmutí svorníku.



Obr. 1: Svorník HRK umístěn ve formičkách pro odlévání repliky

U replik závitových hnízd byly nejprve použity dělené formy, kdy se celý povrch odléval ze čtyř částí vždy po 120° a následně po naskenování softwarově propojen. Později byla vyvinuta metoda, kdy jsme byli schopni odebrat 100 % povrchu v jedné replice. K tomu bylo nutné udělat několik testů a najít nejvhodnější poměr tloušťky stěny replikační hmoty spolu s vhodným způsobem aplikace replikační hmoty mezi závit a formu. Při každém odběru na elektrárně byla metoda inovována, za zlepšení kvality repliky a zkrácení celkové doby odběru.

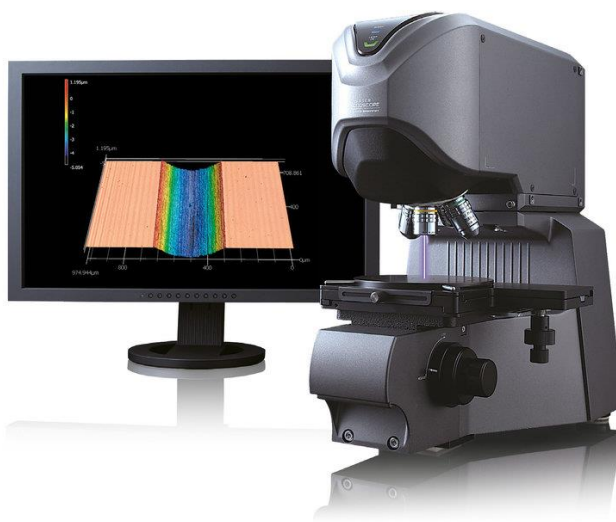


Obr. 2: Replika závitového hnízda (100 % povrchu vnitřního závitu)

Průběh měření

Odběr replik probíhá na dílech očištěných od mastnoty a jiných nečistot. Pokud nedojde k pečlivému očištění, veškeré nečistoty jsou zachyceny případně otištěny do replikační hmoty. Při hodnocení je však možné nečistoty identifikovat na základě jiné barvy povrchu či opačné orientace indikací. Pokud je nečistot na replice větší množství, je nutné pro vyhodnocení stavu povrchu odběr opakovat. Při opakování odběru je povrch většinou dokonale čistý.

K vytvrzení dojde za 15 minut od aplikace hmoty. Po vyjmutí je nutno repliky vložit do nepropustného sáčku, jelikož na sebe může vázat vlivem statické elektřiny prachové částice. V laboratoři je následně provedeno vyhodnocení povrchových defektů. V první fázi je provedeno vizuální posouzení stavu povrchu. Vizuální kontrolou pod mikroskopem Zeiss Stemi 2000-c se zvětšením 6,5×. jsou identifikována místa a typ poškození. Vybrané defekty jsou potom analyzovány na laserovém skenovacím konfokálním mikroskopu VK X-100 při zvětšení 10-50 x, a to v závislosti na velikosti defektu. Vyhodnocení tvaru (profilu) defektu je prováděno s rozlišením až 1 μm v ose Z.



Obr. 3: laserový skenovací konfokální mikroskop VK X-100

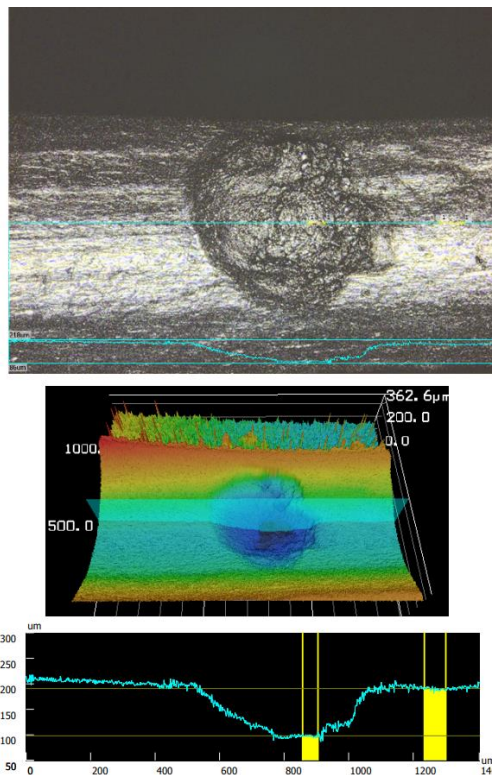
Výsledky měření

Pomocí této metody je možné hledat korozní důlky, lineární indikace a mechanické poškození, kde s přesností jednotek mikronů můžeme měřit jejich velikost, hloubku a polohu.

Navíc díky výstupu v podobě 3D skenu lze stanovit celkovou geometrii defektu, a to nejen na úrovni měření hodnoty hloubky. Díky tomu lze lépe a přesněji zhodnotit působení degradačního mechanismu nebo poškození na materiál závitu.



Obr. 4: Detail korozního důlku



Obr. 5: měření rozměrů důlku pomocí laserového profiloměru

Tato metoda přináší možnost stanovit kritéria přípustnosti při hodnocení závitů. Na rozdíl od subjektivního vizuálního hodnocení nabízí tato metoda objektivní hodnocení, kde lze přesně určit, zda je defekt dle nastavených kritérií vyhovující či nikoliv.

Závěr

Závitové části komponent jsou funkční části, které jsou namáhány nejen mechanicky, ale i dalšími degradačními mechanismy jako je koroze. Jejich stav je kontrolován zejména pomocí vizuální kontroly, která je ovšem subjektivní a hodnocení lze velmi obtížně kvantifikovat.

V případě zjištění poškození je u svorníků možná výměna, ovšem v případě výskytu poškození závitových hnízd přírub je výměna často výrazně nákladná. To se může týkat i velkých svorníků používaných v elektrárnách. V těchto případech má smysl sledovat jejich životnost a rozvoj degradačních mechanismů.

Poděkování

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

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.

Literatura

- [1] ZAHŘÁDKA, Pavel, FULÍN, Zdeněk. *3D měření závitových hnízd přírub nátrubků HRK reaktoru 4. bloku EDU 2022* CVŘ PL-4489/0. Plzeň 2022
- [2] ZAHŘÁDKA, Pavel, VLČEK, Petr. *3D měření závitových hnízd přírub nátrubků HRK 2. bloku EDU*. CVŘ PL-4305/0. Plzeň 2022
- [3] ZAHŘÁDKA, Pavel, VLČEK, Petr. *3D měření svorníků M36x4 nátrubků HRK 2. bloku EDU*. CVŘ PL-4269/0. Plzeň 2021

DIFRAKČNÍ ANALÝZA KORODOVANÝCH VZORKŮ POTRUBÍ SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU JE PŘED A PO APLIKACI NÁSTŘIKU METODOU COLD SPRAY

DIFFRACTION ANALYSIS OF CORRODED SAMPLES OF NPP SECONDARY CIRCUIT PIPES BEFORE AND AFTER COLD SPRAY COATING APPLICATION

Jiří Čapek ^{a)}, Karel Trojan ^{a)}, Nikolaj Ganev ^{a)} a Jiří Žďárek ^{b)}

^{a)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra inženýrství pevných látek

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Cílem depozice nástřiku pomocí vysoce urychleného prášku za studena (tzv. metoda Cold Spray) na vnitřní povrch korodovaných částí potrubí sekundárního okruhu jaderných elektráren (JE) je vytvoření povlaku s vysokou odolností vůči korozi, za účelem prodloužení životnosti především kolen potrubí sekundárního okruhu. Pomocí rentgenografických difrakčních metod byla stanovena jak makroskopická zbytková napětí, tak i fázové složení a parametry reálné struktury (mikrodeformace, velikost krystalitů) povrchových vrstev korodovaných vzorků potrubí sekundárního okruhu JE před a po aplikaci nástřiku metodou Cold Spray. Z výsledků lze soudit, že metoda Cold Spray je progresivní technologie, která by dokázala výrazně zlevnit opravy a zkrátit neplánované prodloužení odstávek bloků JE.

Abstract

The aim of depositing a coating using the so-called Cold Spray on the inner surface of the corroded parts of the pipeline of the secondary circuit of the nuclear power plants (NPP) is to create a surface with high corrosion resistance, to extend the service life, especially of the elbows of the secondary circuit. X-ray diffraction methods were used to determine the macroscopic residual stresses, phase composition, and real structure parameters (microstrain, crystallite size) in the surface layers of corroded pipes of samples of the secondary circuit of the NPP before and after the Cold Spray application. From the results, it can be judged that the Cold Spray method is a progressive technology that could significantly reduce the cost of repairs and shorten the unplanned extension of the shutdown of NPP units.

Úvod

Každý rok se z jaderných elektráren v České republice musí během odstávek odstranit desítky metrů potrubí nejen sekundárního okruhu z důvodu korozního úbytku tloušťky stěn především kolen, kde nejvíce dochází k tzv. FAC (Flow-Accelerated Corrosion), tedy prouděním urychlené korozi [1]. Cílem depozice nástřiku pomocí vysoce urychleného prášku za studena (tzv. metoda Cold Spray) na vnitřní povrch korodovaných částí potrubí je vytvoření povlaku s vysokou odolností vůči korozi za účelem prodloužení životnosti.

Cold Spray (CS) je metoda nanášení povlaků, kdy prášky (o velikosti částic 1–50 μm) jsou urychlovány v nadzvukovém proudu plynu na rychlost až 1200 m/s. Při dopadu na substrát se částice plasticky deformují a přilnou k povrchu. Na rozdíl od dalších technik žárového stříkání (např. plazmového nástřiku, nástřik plamenem) se prášky během procesu stříkání neroztaví a nedochází k tepelné zátěži substrátu, tedy ani ke změně fázového složení a mechanických vlastností [2].

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 napěťové rovnováhy vnějším zásahem. Naopak mikroskopická napětí (popř. mikrodeformace) jsou homogenní v objemech o velikosti jednotlivých krystalitů, jejichž hodnota roste se vzrůstající přítomností poruch mřížky, a tedy i zpevnění. Krystalit (neboli oblast koherentního rozptylu rentgenového záření) v difrakčním smyslu rozumíme monokrystalek, který nemá svou vlastní mozaikovou strukturu. Zrno z hlediska metalografického může zahrnovat naproti tomu obecně i agregát většího počtu různě orientovaných monokrystalků. Parametry reálné skruktury jsou myšleny výše zmíněné mikrodeformace a velikost krystalitů [3]. Zpevněný povrch a tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozní vlastnosti. Zlepšuje se vrubová houževnatost, odolnost proti únavě, opotřebení, naopak se snižuje rychlost šíření trhlin, nebezpečí korozního praskání, náchylnost k mezikrystalové korozi apod. Tyto závěry jsou velmi důležité pro hodnocení integrity tlakových potrubí.

Experiment

Analýza fázového složení, mikrostrukturních parametrů a makroskopických zbytkových napětí byla provedena na zkorodovaných a na opracovaných vzorcích trubky sekundárního okruhu jaderné elektrárny Dukovany (materiál: ČSN 12 022, proudící médium: kondenzát, teplota: 119 °C, tlak: 1,16 MPa, průtok: 262 kg/s, doba provozu: 34 let) a vzorcích s nástřikem Cold Spray. Byl analyzován vnitřní povrch trubky (označeno jako *povrch*), objemový materiál nezasažený korozi (po odebrání 600 μm, označeno jako *objem*), povrch očištěný železným kartáčem (*kartáčováno*) a broušený povrch (*broušeno*), kdy jednotlivé typy opracování byly zvoleny na základě předpokládaných možností přípravy povrchu před samotným nanesením korozivzdorného nástřiku.

Nástřik metodou Cold Spray (CS) byl proveden v Applied Research Laboratory of Penn State University, Pensylvánie, USA. První vazebná vrstva byla vytvořena pomocí prášku skládajícího se z 90 % CrC+NiCr a 10 % Ni, dále bylo naneseno 5 vrstev pomocí prášku, který se skládal z 50 % z CrC+NiCr a z 50 % z nerezové oceli 316L. Jako nosný plyn byl použit dusík o teplotě 625 °C a tlaku 6,1 MPa, kdy výsledná tloušťka nástřiku byla ca 500 μm. Byly analyzovány tři vzorky se stejným nástřikem, ale s různou přípravou povrchu před jeho aplikací (bez úpravy, kartáčováno, broušeno).

Difrakční měření pro určení makroskopických zbytkových napětí bylo prováděno na difraktometru *X'Pert PRO MPD* firmy PANalytical s rentgenkami s chromovou a manganovou anodou. Byly analyzovány difrakční linie $\{211\}$ *bcc* fáze a $\{311\}$ *fcc* fáze. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel byl určen pomocí profilové funkce Pearson VII a Rachingerovy metody na separaci difrakčních maxim $K\alpha_1$. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ pro *bcc* fázi a $\frac{1}{2}s_2 = 6,98 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,87 \text{ TPa}^{-1}$ pro *fcc* fázi. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [3]. Hodnoty zbytkových napětí byly analyzovány ve dvou vzájemně kolmých směrech označených L a T, který je kolmý na obvodový svar trubky. Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami $4 \times 2 \text{ mm}^2$, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenografického záření do zkoumaného materiálu ca 2–7 μm.

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 2–10 μm.

Výsledky a diskuze

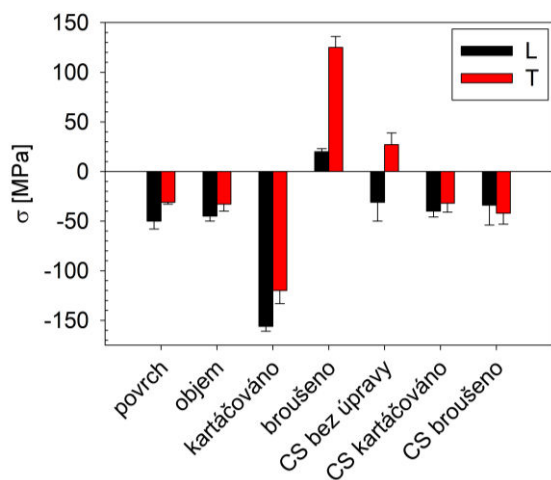
Pomocí kvalitativní fázové analýzy byly na původním vnitřním povrchu potrubí identifikovány tři fáze – α -Fe (*bcc*), Fe_3O_4 a Fe_2O_3 , viz tab. 1. Objemový materiál oceli ČSN 12 022 se dle výsledků skládá ze dvou fází a to α -Fe (*bcc*) a cementitu (Fe_3C). Kartáčováním povrchu nebyly všechny oxidy odstraněny, stále v povrchové vrstvě ca 10 μm tvoří přibližně čtvrtinu, naopak broušením došlo k jejich úplnému odstranění a silná plastická deformace a tepelné zatížení způsobily, že cementit už nebylo možné detekovat. Z tabulky je dále patrné, že způsob, jakým byl povrch očištěn, neovlivňuje fázové složení v povrchové vrstvě nástřiku. V obou případech nástřík obsahuje majoritně *fcc* fázi (Fe-Ni-Cr), chrom a karbid chromu. Uvádí se, že chyby hmotnostních zastoupení majoritních fází nepřesahují 1,5 hm. % a minoritních 0,5 hm. %.

Tab. 1: Hmotnostní zastoupení jednotlivých krystalických fází v analyzovaném objemu vzorků

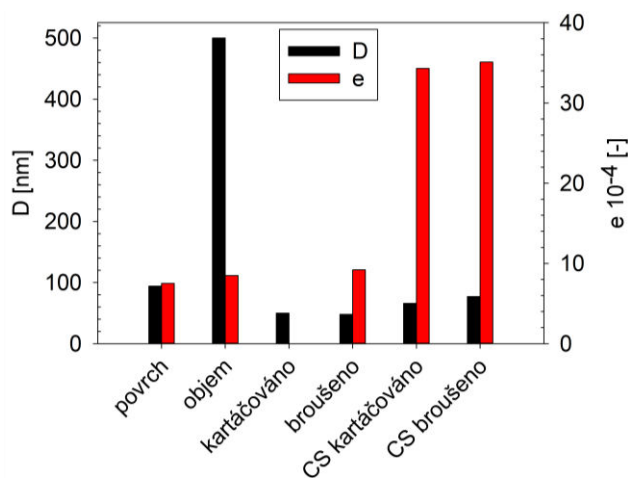
Vzorek	α -Fe (<i>bcc</i>) (hm. %)	Fe_3O_4 (hm. %)	Fe_2O_3 (hm. %)	Fe_3C (hm. %)	γ -Fe (<i>fcc</i>) (hm. %)	Cr (<i>bcc</i>) (hm. %)	Cr_{23}C_6 (hm. %)
povrch	39,1	17,1	43,8				
objem	99,8			0,2			
kartáčováno	73,6	10,4	16				
broušeno	100						
CS kartáčováno					95,1	1,3	3,6
CS broušeno					95,8	1,3	2,9

Povrchová makroskopická zbytková napětí analyzovaných vzorků jsou uvedena na obr. 1. Dlouhá doba provozu trubky za zvýšené teploty a tlaku způsobila, že zbytková napětí se výrazně neliší jak na zoxidovaném povrchu, tak v hloubce 600 μm pod povrchem a nabývají v obou směrech nízkých tlakových hodnot. Kartáčováním povrchu, z důvodu plastické deformace, byla v obou směrech vložena významně tlaková makroskopická napětí. Naopak broušením, kdy materiál je jednak plasticky deformován, ale také zřejmě silně zahříván, došlo ke vzniku významných tahových zbytkových napětí. Vyšších hodnot bylo dosaženo ve směru T, což byl směr hlavního rezného pohybu. Hodnoty zbytkových napětí austenitu (*fcc*), který tvoří majoritu nástřiku Cold Spray, vykazují malý rozptyl a na základě výsledků lze tvrdit, že metoda čištění povrchu významně neovlivňuje stav zbytkových napětí na povrchu poslední vrstvy nástřiku.

Parametry reálné struktury získané pomocí Rietveldovy analýzy jsou uvedeny na obr. 2, kdy byla vyhodnocena velikost krystalitů D a mikrodeformace e , kde chyba hodnot obvykle nepřekračuje 5 %. Velikost krystalitů je výrazně menší na vnitřním povrchu trubky, pravděpodobně z důvodu korozního napadení jednotlivých zrn a jejich rozpadu než v objemovém materiálu, kde výsledky dosáhly maximálních hodnot, co použitý software umožňuje. Naopak mikrodeformace se výrazně neliší. Kartáčováním a broušením došlo vlivem plastické deformace k rozpadu krystalitů, ale k poklesu mikrodeformace došlo jen u kartáčovaného povrchu. Z obrázku je dále patrné, že způsob, jakým byl povrch očištěn, neovlivňuje mikrostrukturní parametry poslední vrstvy nátěru. Oba analyzované CS povrchy vykazují menší krystality a vysoké hodnoty mikrodeformace, což je důsledek silné plastické deformace dopadajících částic na povrch během aplikace nástřiku.



Obr. 1: Povrchová makroskopická zbytková napětí



Obr. 2: Mikrostrukturní parametry – velikost krystalitů D a mikrodefomace e

Závěr

Z hlediska rozložení zbytkových napětí lze konstatovat, že očištění povrchu oceli před aplikací Cold Spray nástřiku kartáčováním je vhodné, neboť na povrchu byla zjištěna pouze tlaková zbytková napětí. Fázová analýza však ukázala, že kartáčovaný povrch stále obsahoval oxidy železa, mikrostrukturní parametry nevykazují významné rozdíly.

Způsob, jakým byl povrch očištěn, neovlivňuje fázové složení a mikrostrukturní parametry poslední vrstvy CS nástřiku. Hodnoty zbytkových napětí austenitu (γ -Fe; fcc), který tvoří majoritní krystalografickou fázi nástřiku Cold Spray, vykazují malý rozptyl. Metoda čištění povrchu tedy významně neovlivňuje stav makroskopických zbytkových napětí poslední vrstvy CS nástřiku, který byl analyzován.

Z výsledků lze soudit, že metoda Cold Spray je progresivní technologie, která by dokázala výrazně zlevnit opravy a zkrátit neplánované prodloužení odstávek bloků JE.

Poděkování

Práce byla podpořena projektem CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778 „Centrum pokročilých aplikovaných přírodních věd“ v rámci Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání pod dohledem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS22/183/OHK4/3T/14.

Literatura

- [1] AHMED, Weal. Flow accelerated corrosion in nuclear power plants. In: *Nuclear Power- Practical Aspects*. Rijeka: IntechOpen, 2012, s. 153-178. ISBN 978-953-51-0778-1.
- [2] PAPYRIN, Anatolii, KOSAREV, Vladimir, KLINKOV, Sergey, ALKHIMOV, Anatolii, FOMIN, Vasily. *Cold spray technology*. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN 0-08-045155-1.
- [3] KRAUS, Ivo, GANEV, Nikolaj. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.

KOROZNÍ ODOLNOST EUROFER-97 V PROSTŘEDÍ TEKUTÝCH KOVŮ

CORROSION RESISTANCE OF EUROFER-97 IN HEAVY LIQUID METALS ENVIRONMENT

Martina Pazderová ^{a)}, Lukáš Košek ^{a)}, Anna Hojná ^{a)} a Hynek Hadraba ^{b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i.

Abstrakt

Eurofer-97 je jedním z materiálů, u kterých je posuzována vhodnost použití pro reaktory Gen IV. Důležitým krokem je ověření korozního chování v prostředí tekutých kovů. Cílem práce bylo jednak studium korozního chování oceli v tekutém olovu pomocí dlouhodobých zkoušek v proudícím prostředí a následně i ověření odolnosti za extrémních podmínek v prostředí PbLi. Pro následné hodnocení byl použitý rastrovací elektronový mikroskop včetně detektoru pro charakterizaci složení vrstev. Statistické vyhodnocení umožnilo studovat vliv doby expozice a vývoj oxidických vrstev v prostředí Pb a rozpouštění oceli v prostředí PbLi.

Abstract

Eurofer-97 is considered a potential structural material for GEN IV reactors, and its properties and ability to withstand the given environment are assessed. An essential part of the research is verifying the corrosion behaviour in a liquid metal environment. The aim of the work was to study the corrosion behaviour of steel in liquid lead using long-term tests in a flowing environment and subsequent verifying the resistance under extreme conditions in PbLi environment. A scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy were used for subsequent evaluation. The effect of exposure time and the development of oxide layers in the Pb environment and dissolution in PbLi environment were studied and statistically evaluated.

Úvod

Tekuté těžké kovy (HLM) představují díky svojí vysoké tepelné vodivosti a bodu varu a velkému měrnému teplu vhodné kandidáty na chladicí médium pro reaktory příští generace. Je ovšem nezbytné najít materiály vhodné pro takové prostředí. Jednou z možností využití Eurofer-97 je jeho aplikace jako strukturní materiál pro demonstrátor prvního olovem chlazeného reaktoru (LFR) „ALFRED“. Vzhledem ke skutečnosti, že se předpokládá využití kyslíku jako inhibitoru koroze, je použití oceli s vysokou schopností oxidace nanejvýš žádoucí. Feriticko-martenzitické (FM) oceli s 9-14 hm.% Cr byly dlouhodobě studovány a jejich chování bylo ověřováno při různých teplotách i koncentracích kyslíku, a to zejména v prostředí PbBi [1,2]. Dřívější studie potvrzují schopnost vytvářet oxidické vrstvy při kontaktu s HLM. Chování Eurofer-97 zatím nebylo důkladně studováno v prostředí tekutého Pb a proto byla prováděna tato studie, aby bylo možné ověřit jeho použitelnost pro LFR.

FM oceli se sníženou schopností aktivace jsou zároveň vhodnými kandidáty na strukturní materiály pro fúzní reaktory. V případě fúzních reaktorů je potřeba vyřešit odolnost materiálu v prostředí PbLi. Na rozdíl od LFR nelze použít inhibici koroze pomocí kyslíku a dochází tak k rozsáhlému rozpouštění, které je ovlivněné jednak prostředím, složením oceli a rozpustností jednotlivých prvků v PbLi, přičemž zásadní vliv na rozpustnost má teplota a rychlost proudění prostředí. Chování Eurofer-97 v prostředí PbLi bylo doposud studováno zejména při teplotách 480–550 °C, protože to jsou limitní hodnoty použitelnosti konvenční FM oceli [3-7]. V budoucnu se předpokládá využití vyšších pracovních teplot, a proto byla v rámci studie chování ověřena odolnost ODS (oxide dispersion-strengthened) Eurofer.

Experimentální část

Zkušební vzorky byly připraveny z oceli Eurofer-97 a ODS varianty Eurofer, jejichž složení je uvedeno v Tab. 1. Korozní odolnost Eurofer-97 v tekutém Pb byla ověřována v neizotermní experimentální smyčce MatLoo s řízenou koncentrací kyslíku, která simuluje podmínky reálného provozu. Smyčka obsahuje dvě paralelní sekce pro umístění vzorků do prostředí tekutého Pb, proudícího rychlostí max 3 m/s. Obsah kyslíku byl sledován pomocí čtyř sensorů a koncentrace kyslíku byla udržována na hodnotě 1×10^{-7} hm.%. použitá pracovní teplota byla 480 °C a hodnocení vzorků probíhalo po 1 000 h, 2 000 h, 4 000 h a 8 000 h expozice. Vyhodnocením naměřených dat bylo možné získat informace o časové závislosti změn probíhajících v materiálu.

Simulace podmínek fúzní aplikace probíhala ve statickém tanku, který je tvořený nerezovou nádobou. V té byl umístěný Al_2O_3 kelímek obsahující přibližně 13,5 kg PbLi (16 % Li, 99,98% čist.), který zamezuje kontaktu nerezové nádoby s tekutým PbLi a nedochází k ovlivnění expozice vzorků. Pracovní teplota byla udržována na 600 °C a bez přítomnosti kyslíku pomocí argonu. Hodnocení vzorků probíhalo po 500 h a 1 000 h.

Všechny exponované vzorky byly hodnoceny jednak na povrchu a následně byl proveden řez, aby bylo možné stanovit hloubku poškození a definovat druhy napadení. Vyhodnocení probíhalo pomocí SEM s prvkovou analýzou složení (TESCAN LYRA3, TESCOAN Brno). Na řezu bylo provedeno vyhodnocení způsobu korozního poškození a zároveň statistické stanovení míry poškození a jeho vývoj v čase. Pro statistické vyhodnocení příčného řezu vzorků exponovaných v Pb bylo vytvořeno 24 snímků po obvodu vzorku s pravidelným posunem o 15 ° a u vzorků exponovaných v PbLi bylo vytvořeno 15 snímků v pravidelných rozstupech po celé šířce vzorku. Na každém snímku bylo následně provedeno deset měření korozního poškození a získaná data byla graficky zpracována.

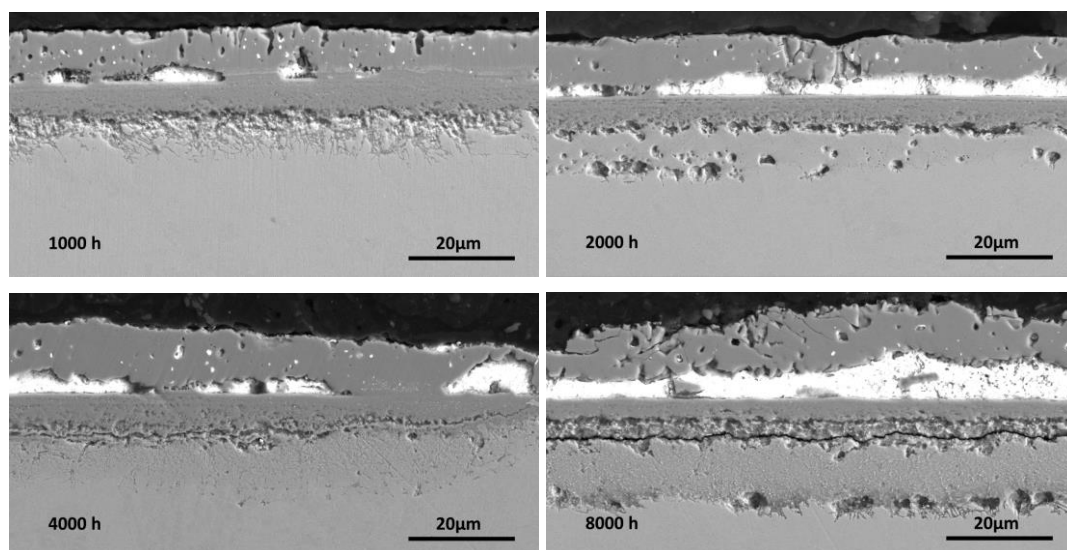
Tab. 1: Chemické složení oceli Eurofer-97 a ODS Eurofer-97, hm. %

	Fe	Cr	Mn	W	V	Ta	Y	Sc
Eurofer-97	Bal.	8,95	0,55	1,04	0,20	0,14	-	-
ODS Eurofer	Bal.	8,87	0,72	0,94	0,19	0,13	0,16	0,28

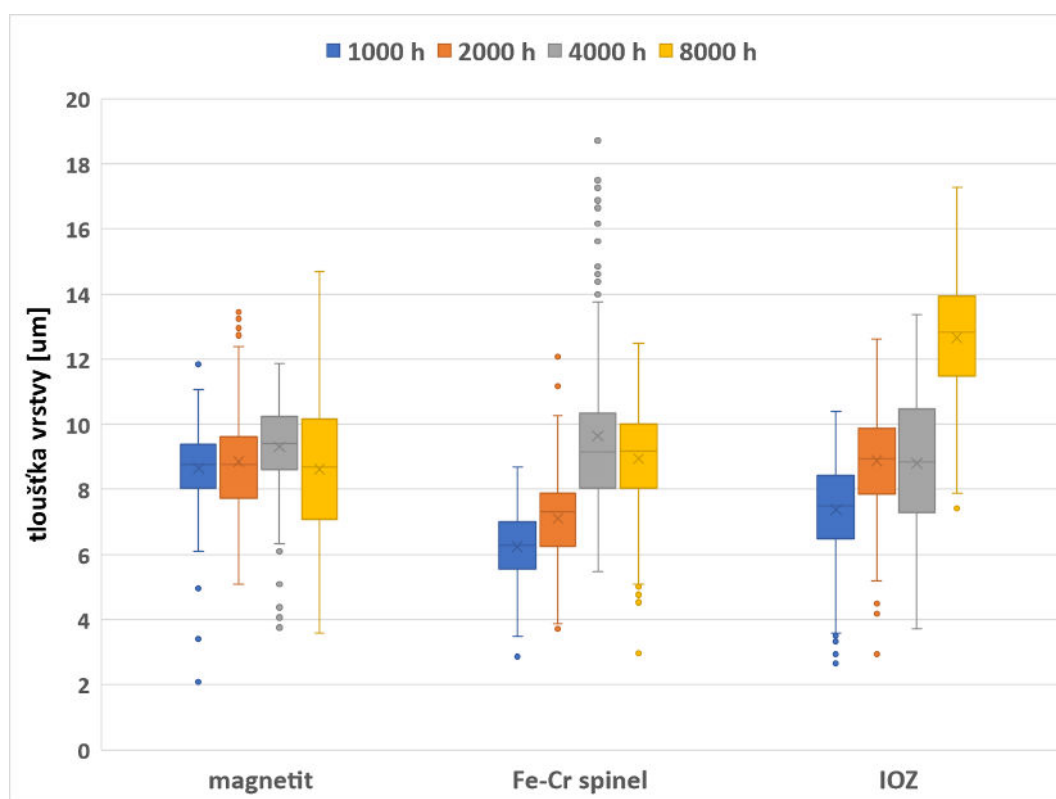
Výsledky a diskuze

Expozice Pb

Vyhodnocení vzorků po expozici ukázalo, že již po 1000 h došlo téměř na 100 % povrchu k vytvoření souvislé vrstvy vnějšího oxidu. Tato vrstva oxidu obsahovala značné množství zateklého Pb. Po 2000 h expozice došlo k penetraci olova mezi magnetit a Fe-Cr spinel na většině povrchu sledovaného řezu a v důsledku přítomnosti olova mezi vrstvami bylo možné sledovat zvlnění a následně i odtržení magnetitu od povrchu spinelu. S rostoucí tloušťkou povrchového filmu docházelo ke vzniku trhlin a dutin ve vrstvě spinelu. Po 8000 h expozice byly na vzorcích patrné všechny typy poškození – silná vrstva magnetitu, která byla oddělená od Fe-Cr spinelu, progredující interní oxidační zóna (IOZ) a olovo zateklé mezi magnetit a spinel. Na Obr. 1 je vidět vývoj oxidických vrstev v čase.



Obr. 1: SEM-BSE snímky Eurofer-97 zobrazující vývoj oxidických vrstev s rostoucí dobou expozice a penetraci Pb mezi vrstvy



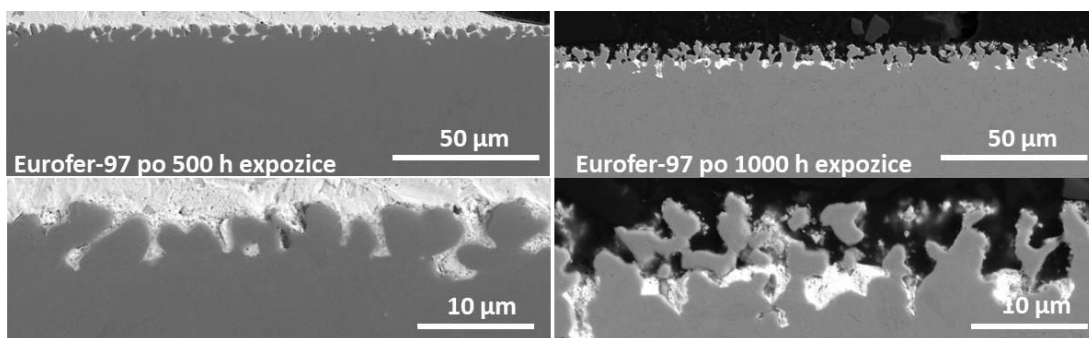
Obr. 2: Statistické vyhodnocení oxidace Eurofer-97 v prostředí Pb, vývoj jednotlivých vrstev v čase

Na základě vyhodnocení všech snímků řezů bylo možné definovat jednotlivé typy poškození a zároveň stanovit nárůst a vývoj v čase. Z grafu na Obr. 2 je patrné, že již po 1000 h expozice došlo k vytvoření 9 μm silné vrstvy magnetitu, přičemž průměrná tloušťka vnějšího oxidu zůstávala stejná po celou dobu expozice. Větší rozptyl hodnot získaných po 8000 h expozice ukazuje na skutečnost, že postupně docházelo k odlupování vrstvy a jejímu novému nárůstu. Je

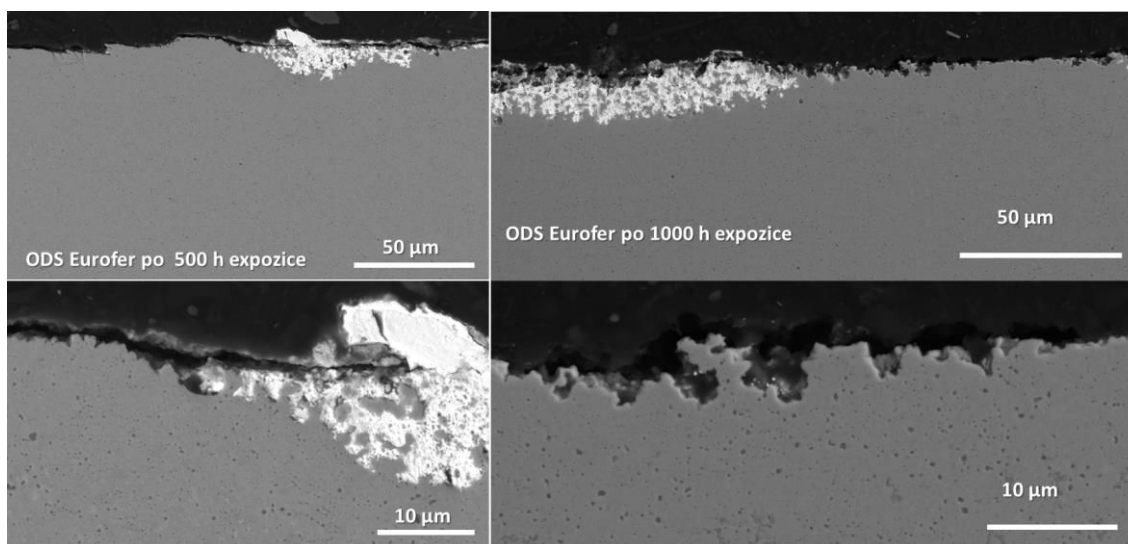
zřejmé, že magnetit netvořil stabilní ochrannou vrstvu, která by bránila dalšímu pronikání kyslíku do povrchu oceli a brzdila tak degradaci Eurofer-97. Vývoj Fe-Cr spinelu v čase ukázal, že během prvních 4000 h expozice docházelo k postupnému nárůstu vrstvy, ale v následujících 4000 h zůstal Fe-Cr spinel beze změny. Vyhodnocení nárůstu oxidických vrstev ukázalo, že řídicím procesem je difuze po hranicích zrn, a protože vrstva magnetitu nebyla kompaktní, nemohla poskytnout dostatečnou ochranu proti oxidaci. Je tak evidentní, že při dlouhodobé expozici docházelo k lineárnímu nárůstu IOZ i úbytků materiálu.

Expozice PbLi

Zcela odlišné chování měl Eurofer-97 v prostředí PbLi. Protože se jednalo o prostředí bez přítomnosti kyslíku, jediným degradačním procesem bylo rozpouštění (SBA) a penetrace Pb do materiálu. SEM hodnocení materiálu na řezu ukázalo, že s rostoucí dobou expozice docházelo k nárůstu SBA zóny (Obr. 3). SEM-EDS analýza ukázala, že v průběhu expozice Fe a Cr difundovalo k povrchu a následně se rozpouštěly v PbLi. Nárůst korozních úbytků byl lineární, stejně jako v případě růstu oxidických vrstev.



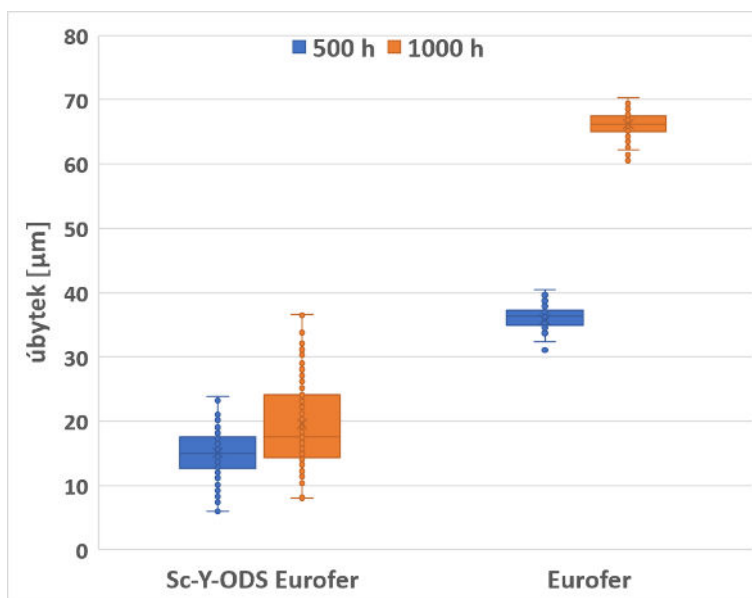
Obr. 3: SEM-BSE snímky zobrazující degradaci Eurofer-97 při působení PbLi



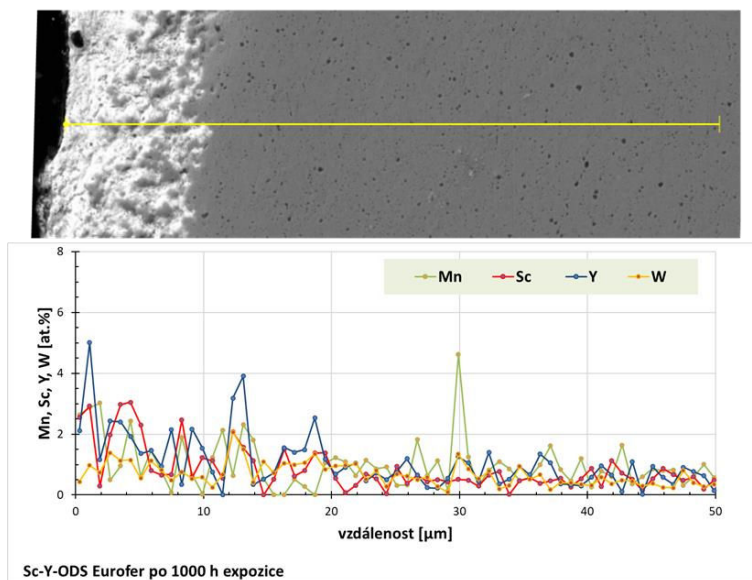
Obr. 4: SEM-BSE snímky zobrazující degradaci ODS Eurofer při působení PbLi

V případě ODS Eurofer bylo také jediným degradačním procesem SBA doprovázené penetrací Pb (Obr. 4). Byl zde ale patrný odlišný průběh degradace (Obr. 5). V případě Eurofer-97 docházelo k lineárnímu nárůstu korozních úbytků v čase, zatímco ODS Eurofer měl parabolický charakter úbytků s výrazně nižšími hodnotami než v případě Eurofer-97. Pro zlepšení vlastností Eurofer-97 byly použity jako legující prvky Sc a Y. ODS Eurofer měl výrazně jemnější strukturu, a protože difuze probíhala po hranicích zrn, je patrné mírnější

poškození než v případě Eurofer-97. SEM-EDS analýza také prokázala difuzi Cr k povrchu, rozpouštění v PbLi a vznik ochuzené vrstvy na povrchu materiálu. Zároveň bylo z analýzy patrné, že v průběhu expozice docházelo k difuzi Sc a Y k povrchu oceli a nárůstu jejich koncentrace s rostoucí dobou expozice. Na Obr. 6 je vidět, že po 1000 h expozice byla zaznamenána až desetkrát vyšší koncentrace sledovaných prvků na povrchu. Vzhledem ke skutečnosti, že rozpustnost Sc a Y v PbLi je ve srovnání s Cr a Fe nízká, vytvářela se tak na povrchu ochranná vrstva, která bránila rychlému rozpouštění oceli.



Obr. 5: Statistické vyhodnocení vývoje korozních úbytků v čase



Obr. 6: SEM-EDS analýza ODS Eurofer oceli potvrzující nárůst koncentrace Sc a Y v povrchové vrstvě

Závěr

Studium chování Eurofer-97 v různých HLM prostředích ukázalo odlišná chování v závislosti na použitém médiu. Výsledky experimentů lze shrnout následujícím způsobem:

- Při expozici v olovu nedocházelo k rozpouštění, jediný způsob poškození byla oxidace. Růst oxidů měl lineární charakter, tzn. nízkou odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. Na povrchu se vytvořila vrstva magnetitu, která ale nebyla kompaktní, docházelo k penetraci Pb až na rozhraní se spinelem a následnému odlupování a opakovanému nárůstu vrstvy. Z tohoto důvodu magnetit neplnil předpokládanou ochrannou funkci.
- Zcela opačný průběh měla expozice v PbLi. Jediným způsobem poškození bylo SBA a stejně jako při expozici Pb docházelo k penetraci média do oceli. Rychlost rozpouštění byla dána rozpouštěním Fe a Cr. V případě Eurofer-97 byl nárůst korozních úbytků v čase lineární. ODS Eurofer prokázal v daném prostředí vyšší odolnost, a to zejména díky přítomnosti povrchové vrstvy bohaté na Sc-Y.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Czech Science Foundation project No. 20-20873S. At CVR, the presented work has been realized within Institutional Support by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

Literatura

- [1] MACHUT, McLean, SRIDHARAN, Kumar, LI, Ning, UKAI, Shigeharu and ALLEN, Todd. Time dependence of corrosion in steels for use in lead-alloy cooled reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2007. Vol. 371, no. 1–3, pp. 134–144. DOI 10.1016/j.jnucmat.2007.05.009.
- [2] GONG, Xing, SHORT, Michael P., AUGER, Thierry, CHARALAMPOPOULOU, Evangelia and LAMBRINOU, Konstantina. Environmental degradation of structural materials in liquid lead and lead-bismuth eutectic-cooled reactors. *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 126. DOI 10.1016/j.pmatsci.2022.100920.
- [3] KONDO, Masatoshi, TAKAHASHI, Minoru, TANAKA, Teruya, TSISAR, Valentyn and MUROGA, Takeo. Compatibility of reduced activation ferritic martensitic steel JLF-1 with liquid metals Li and Pb-17Li. *Fusion Engineering and Design*. 2012. Vol. 87, no. 10, pp. 1777–1787. DOI 10.1016/j.fusengdes.2011.12.013.
- [4] KONYS, J., KRAUSS, W., NOVOTNY, J., STEINER, H., VOSS, Z. and WEDEMEYER, O.. Compatibility behavior of EUROFER steel in flowing Pb-17Li. *Journal of Nuclear Materials*. 2009. Vol. 386–388, no. C, pp. 678–681. DOI 10.1016/j.jnucmat.2008.12.271.
- [5] KRAUSS, W., WULF, S. E. and KONYS, J.. Long-term corrosion behavior of ODS-Eurofer in flowing Pb-15.7Li at 550 °C. *Nuclear Materials and Energy*. 2016. Vol. 9, pp. 512–518. DOI 10.1016/j.nme.2016.04.011.
- [6] LI, Yanfen, ABE, Hiroaki, NAGASAKA, Takuya, MUROGA, Takeo and KONDO, Masatoshi. Corrosion behavior of 9Cr-ODS steel in stagnant liquid lithium and lead-lithium at 873 K. *Journal of Nuclear Materials*. 2013. Vol. 443, no. 1–3, pp. 200–206. DOI 10.1016/j.jnucmat.2013.07.026.
- [7] BASSINI, S., CUZZOLA, V., ANTONELLI, A. and UTILI, M.. Long-term corrosion behavior of EUROFER RAFM steel in static liquid Pb-16Li at 550 °C. *Fusion Engineering and Design*. 2020. Vol. 160. DOI 10.1016/j.fusengdes.2020.111829.

MONITOROVANIE KORÓZNYCH PROCESOV V PRIMÁRNOM OKRUHU JADROVÝCH ELEKTRÁRŇACH TYPU VVER-440 S VYUŽITÍM KORÓZNYCH SLUČIEK

MONITORING OF CORROSION PROCESSES IN THE PRIMARY CIRCUIT OF NUCLEAR POWER PLANT VVER-440 TYPE USING CORROSION LOOPS

Dávid Slněk ^{a, b)} a Michal Hajas ^{a)}

^{a)} VUJE a.s., Okružná 5, 918 64, Trnava, Slovenská republika

^{b)} Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu č. 2781/25, 917 24, Trnava, Slovenská republika,

Abstrakt

Dlhodobá prevádzka jadrových blokov vyžaduje splnenie mnohých podmienok tak, aby bola zaistená ich bezpečná prevádzka aj po presiahnutí pôvodnej plánovanej doby prevádzky. Medzi tieto podmienky patrí aj dlhodobá korózna odolnosť konštrukčných materiálov primárneho okruhu, ktorá má svoje špecifiká dané prevádzkovými charakteristikami, ako aj materiálovým riešením kritických uzlov. Napriek veľkej pozornosti, ktorá je primárnemu okruhu venovaná, v niektorých prípadoch môže dôjsť k vzniku a rozvoju korózneho poškodenia.

Predkladaný príspevok popisuje program monitorovania korózie založený na overovacích vzorkách, navrhnutý a realizovaný spoločnosťou VUJE, a.s. Overovacie vzorky sú umiestnené v korózných komorách, ktoré sú súčasťou primárneho okruhu JE a slúžia pri hodnotení účinkov skutočných prevádzkových médií na koróznú stabilitu konštrukčných materiálov v podmienkach dlhodobej prevádzky JE Bohunice a JE Mochovce. Príspevok popisuje princíp, na ktorom je systém korózných slučiek založený, náplň jednotlivých modulov, v ktorých sú overovacie vzorky umiestnené a prehľad aktuálneho stavu prevádzkovaných korózných slučiek, resp. náplní, ktoré boli vytiahnuté po 8 a 9 ročnej expozícii.

Abstract

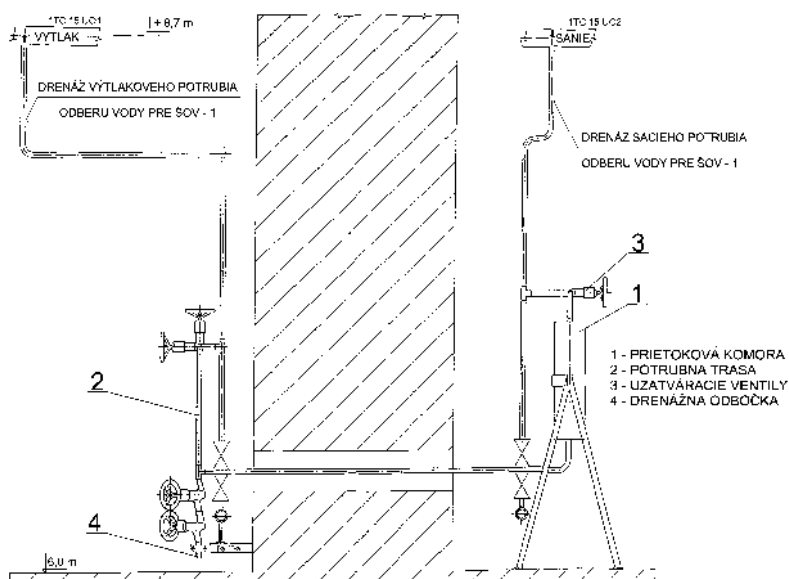
The long-term operation of nuclear power unit lifetime requires many conditions to be met in order to ensure their safe operation even after the original design lifetime has been exceeded. These conditions also include the long-term corrosion resistance of the primary circuit materials, which has its specifics given by the operational characteristics as well as the material design of the safety important parts. In spite of the special attention given to the primary circuit, in some cases corrosion damage may initiate and develop.

This paper describes the corrosion monitoring program based on surveillance samples, designed and implemented by VUJE, a.s. Verification samples are situated in corrosion equipment and serve to evaluate the effects of operating media on the stable stability of construction materials in the long-term operation chambers of NPP Bohunice and NPP Mochovce. The paper describes the principle on which the system of corrosion loops is based, the contents of the individual modules in which the verification samples are located, and an overview of the current state of the operating corrosion loops or fillings that were pulled out after 8 and 9 years of exposure.

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 závažných problémov súvisiacich s koróziou konštrukčných materiálov. V príspevku je popísaný systém monitorovania korózných procesov - korózna slučka (KS), najmä pre hodnotenie vplyvu primárneho média na koróznú stabilitu konštrukčných materiálov v podmienkach dlhodobej prevádzky JE Bohunice (EBO) a Mochovce (EMO).

Základný princíp korózných slučiek, inštalovaných v EBO a EMO je rovnaký – exponuje sa sada vzoriek v špeciálnej komore, cez ktorú preteká korózne médium – chladivo primárneho okruhu. Prietok média koróznou komorou zabezpečuje tlakový spád medzi výtlakom a saním hlavného cirkulačného čerpadla. Schéma pripojenia KS na 3. bloku EBO je na Obr. 1 [1].



Obr. 1: Schéma pripojenia korózneho slučky

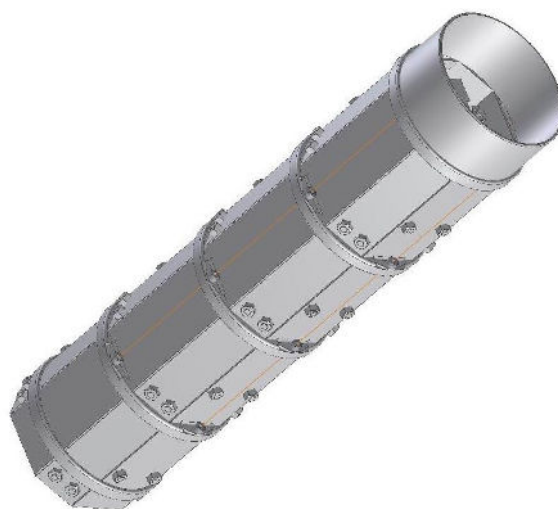
Prvá, jednokomorová KS bola nainštalovaná v roku 1992 do primárneho okruhu na 3. bloku EBO. Korózna slučka v EMO je umiestnená v primárnom okruhu 1. bloku. Táto je však vybavená dvomi, vzájomne oddeliteľnými komorami umožňujúcimi nezávislé exponovanie dvoch sérií vzoriek. Slučka bola uvedená do prevádzky v roku 1999 [2].

Prvá etapa prevádzkovania korózneho slučky prebiehala do roku 2008. V tomto roku boli všetky náplne vymenené za modulový systém, ktorý zjednocoval overovacie vzorky pre obe lokality. Prvé moduly boli vytiahnuté v roku 2012 t.j. po 4-ročnej expozícii. Z doteraz získaných výsledkov vyhodnotenia predchádzajúcich náplní vyplýva, že sledovaný konštrukčný materiál je v daných podmienkach odolný, a až na výnimky, neboli pozorované stopy korózneho napadnutia.

V rokoch 2020 (EBO) a 2021 (EMO) boli vytiahnuté náplne so vzorkami, ktoré poskytujú jedinečnú príležitosť pre analýzu konštrukčných materiálov JE po dlhodobej 12 resp. 13 ročnej expozícii.

Konstrukčné riešenie koróznej slučky

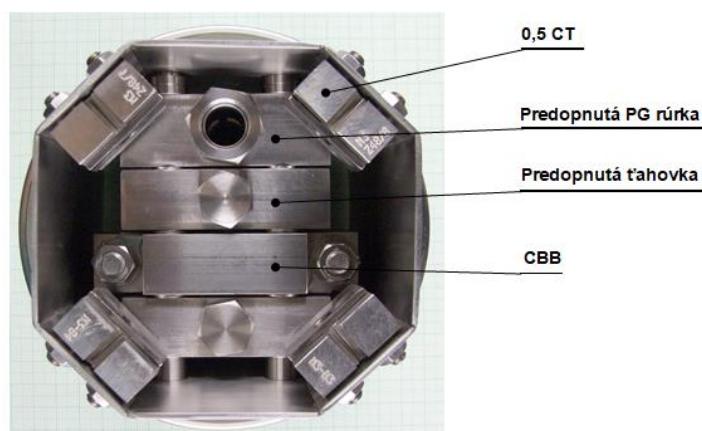
Konstrukčný návrh vnútornej konštrukcie KS vychádza zo základnej požiadavky rozdeliť pracovný priestor komory na 4 rovnako dlhé moduly (viď Obr. 2). Celá konštrukcia je tvorená 4 modulmi rovnakej dĺžky, pričom stredné moduly sú celkom rovnaké, krajné moduly sa líšia polohou a typom vodiacich krúžkov. Všetky moduly majú príruby, ktoré je možné vzájomne spojiť pomocou skrutiek. Príruby súčasne slúžia ako vodiace krúžky v koróznej komore a vymedzujú vôľu zmontovanej vnútornej konštrukcie v komore. V zloženom stave je celá vnútorná konštrukcia vložená v koróznej komore a vedená 5 vodiacimi krúžkami, aby pri demontáži nedošlo k zaseknutiu náplne v komore, a s tým spojenými problémami pri vyberaní. Pri výmene modulu sa po vybratí celej zostavy demontujú príslušné skrutky, a pôvodný modul sa nahradí novým modulom rovnakého typu. Celá konštrukcia sa opäť spojí skrutkami a vloží do novej komory [3].



Obr. 2: Vnútorná konštrukcia modulového typu

Popis vytiahnutých vzoriek a spôsob ich vyhodnotenia

Náplň vzoriek v moduloch vytiahnutých z EBO a EMO je totožná (ilustratívne na Obr. 3). Pre monitorovanie koróznych procesov 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.



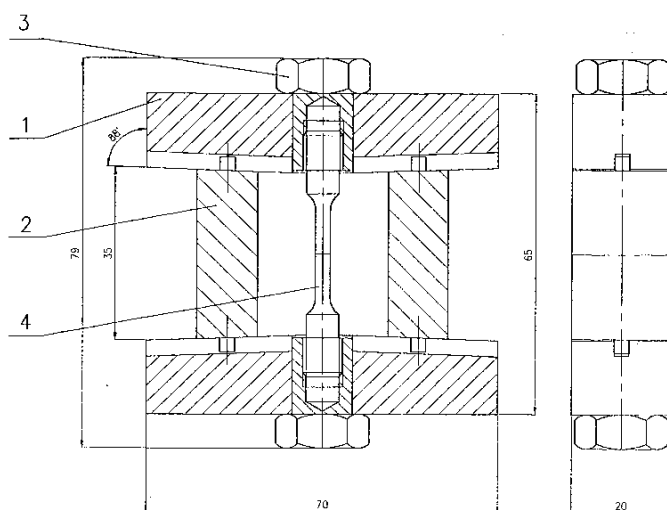
Obr. 3: Umiestnenie vzoriek v moduly

Pre monitorovanie boli použité nasledujúce typy vzoriek:

Predopnuté ťahové vzorky

Vzorky vo forme teliesok pre skúšku ťahom sú namáhané jednoosovým zaťažením vyvolaným konštantnou deformáciou vzorky. Vzorky sú určené na sledovanie iniciačného štádia vzniku trhlín. Povrch drieku vzorky v aktuálnom prípade bol elektrolyticky leštený. Schéma napínacieho rámčeka s ťahovou vzorkou je na Obr. 4.

Po expozícii sa detailne kontroluje povrch vzorky, hodnotí sa veľkosť a počet jamiek a prítomnosť prípadných trhlín. Na pozdĺžnom reze sa kontroluje počet jamiek, počet a hĺbka trhlín, ako aj ich vzťah k mikroštruktúre.



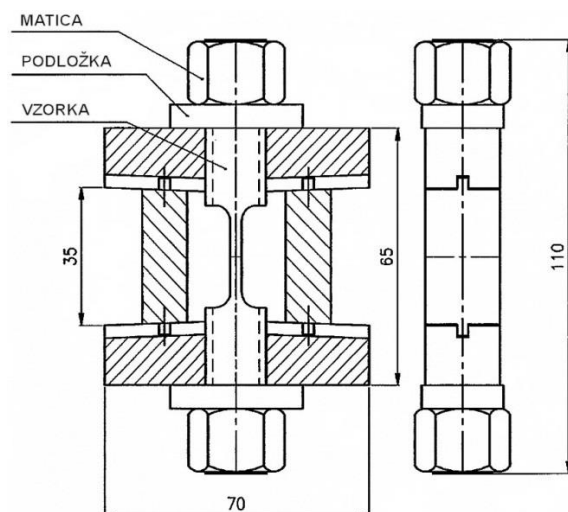
Obr. 4: Schéma rámčeka na predpínanie ťahových vzoriek:

1- rameno, 2- stĺpik, 3- matica, 4- vzorka

Predopnuté vzorky z PG rúrky

Uvedený typ vzoriek vychádza z rovnakého princípu ako v prípade predopnutých ťahových vzoriek. Spôsob zaťažovania je rovnaký. Odfrézovaním časti steny rúrky sa zmenší prierez rúrky, čím sa zmenší predpínacia sila na dosiahnutie požadovaného napätia. Vzorka rúrky je v zaťažovacom rámčeku upevnená pomocou dvojice matíc. Aj v tomto prípade sú vzorky namáhané jednoosovým zaťažením vyvolaným deformáciou vzorky a podľa hodnoty deformácie ($\sim 1,5\%$) sa stanoví zaťažovacie napätie. Vzorky sú určené na sledovanie iniciačného štádia vzniku trhlín. Schéma predpínacieho rámčeka s ťahovou vzorkou je na Obr. 5.

Po expozícii prebieha kontrola vzoriek v rovnakom rozsahu ako pri predopnutých ťahových vzorkách.

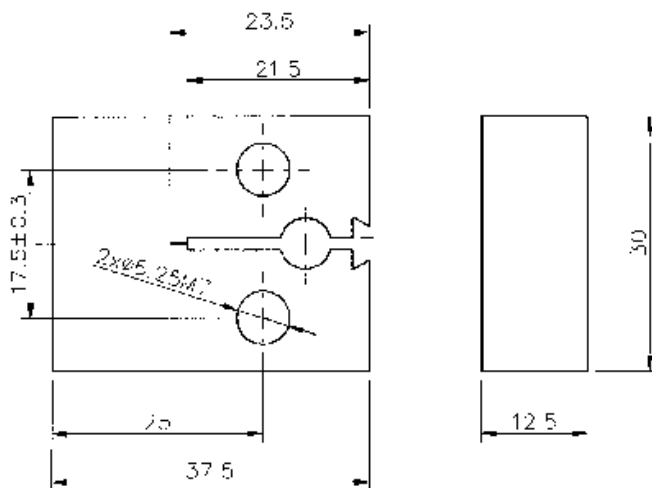


Obr. 5: Schéma predpnutej vzorky z PG rúrky v predpínacom rámečku

Vzorky typu CT telies

Vzorky umožňujú sledovať mechanizmus šírenia sa trhlin na zaťaženom telese s vopred vytvorenou trhlínou. Na vyrobených vzorkách sa cyklickým únavovým zaťažovaním pripravili iniciačné únavové trhliny definovanej veľkosti. Vlastné predopnutie sa realizovalo zaťažením vzoriek na požadovanú hodnotu. Pomocou dvojice klinov vložených do stredného otvoru sa zaťaženie vzorky zafixovalo. Na monitorovanie sú použité zmenšené vzorky označované ako 0,5-CT (Obr. 6). Skúšobnú sériu tvoria dve vzorky zo základného materiálu a dve vzorky zo zvarového kovu.

Po expozícii sa na každej vzorke vyhodnotí prípadný pokles predpínacieho napätia. Vzorky sa následne rozcyklujú a rozlomia a na lomovej ploche sa zmeria prírastok trhliny počas expozície pri danom zaťažení. Z doby expozície, veľkosti zaťaženia a prírastku trhliny sa určí rýchlosť rastu trhliny.



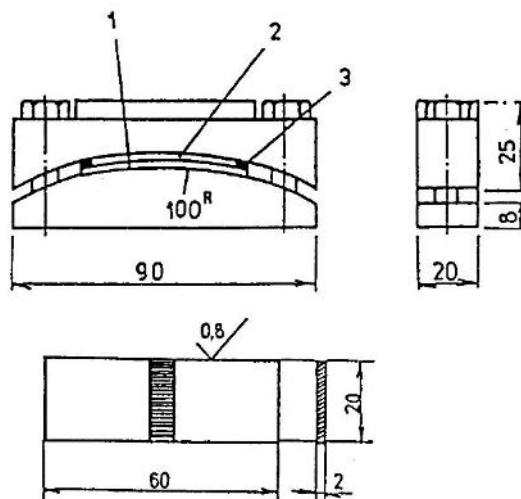
Obr. 6: Schéma skúšobného 0,5-CT telesa

Vzorky typu CBB

Tento typ vzoriek predstavuje veľmi prísny spôsob sledovania procesov štrbinovej korózie a korózneho praskania. Vzorky upevnené v držiaku sú namáhané konštantnou deformáciou (1 %). Navyše je vzorka vystavená štrbinovému efektu, keď je medzi vzorku a držiak vložená grafitová vata, ktorá podporuje kyslíkovú depolarizačnú reakciu. Na Obr. 7 je vidieť tvar

a základné rozmery vzorky typu CBB vrátane držiaka Sériu v aktuálne exponovaných moduloch tvorí jedna vzorka zo základného materiálu a jedna vzorka zo zvarového kovu.

Po expozícii sa detailne kontroluje povrch vonkajšieho ohybu vzorky, hodnotí sa veľkosť a počet jamiek a prítomnosť prípadných trhlín. Na pozdĺžnom reze sa kontroluje počet jamiek, počet a hĺbka trhlín a ich vzťah k mikroštruktúre [4].



Obr. 7: Schéma držiaka a vzorky typu CBB:

1-vzorka, 2-grafitová vata, 3-dištančná podložka

Záver

V predkladanom príspevku je opísaný systém pre dlhodobé monitorovanie korózných procesov vybraných zariadení JE. Uvedený systém predstavujú finančne nenáročný spôsob monitorovania, ktorý zabezpečuje exponovanie originálnych vzoriek v reálnych prevádzkových podmienkach. Z doposiaľ získaných výsledkov krátkodobo exponovaných vzoriek vyplýva, že použitý konštrukčný materiál zabezpečuje dostatočnú koróznú stabilitu, pokiaľ z metalurgického hľadiska neobsahuje žiadne neprípustné defekty, alebo nie je lokálne extrémne znečistený.

Vzorky vybrané z KS inštalovanej na 3. bloku JE Bohunice (v roku 2020) a 1. bloku JE Mochovce (v roku 2021), ktoré boli v prevádzke od roku 2008, budú predmetom analýz v druhej polovici roku 2022. Tieto vzorky predstavujú jedinečnú príležitosť pre hodnotenie dlhodobého pôsobenia korózneho prostredia na vybrané konštrukčné materiály jadrových zariadení.

Literatúra

- [1] Kupča, L., Březina M.: Operational environment influence monitoring on the corrosion behaviour of WWER-440 primary piping materials, EUROCORR'97, Trondheim 22. – 25.9.1997
- [2] Březina, M., Kupča, L., Bařák, J., Provazník, J. : Monitorovanie korózie v jadrove-energetických zariadeniach SR. Korózia v energetike 2004, Kořice.
- [3] Březina M., Pilát P. Rekonštrukcia korózneho slučky v JE Mochovce 1. blok. Technická správa VUJE č. 0360/36/2008, Trnava, 2008.
- [4] Březina M. Dokumentácia k výmene modulu KS-EBO. Technická správa VUJE č. 0360/29/2012, Trnava, 2012.

HODNOTENIE HMOTNOSTNÝCH ÚBYTKOV V RÁMCI KORÓZNEHO PROGRAMU MONITOROVANIA NÁDRŽÍ PRE SKLADOVANIE KVAPALNÝCH RÁDIOAKTÍVNYCH ODPADOV

EVALUATION OF MASS LOSSES COUPONS IN A CORROSION MONITORING PROGRAM FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE STORAGE TANKS

Michal Hajas ^{a)} a Dávid Slněk ^{a, b)}

^{a)} VUJE a.s., Okružná 5, 918 64, Trnava, Slovenská republika

^{b)} Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu č. 2781/25, 917 24, Trnava, Slovenská republika,

Abstrakt

Odolnosť proti korózii prevádzkovaných komponentov je jednou z najdôležitejších podmienok dlhodobého, ale hlavne bezpečného prevádzkovania všetkých jadrových zariadení, zariadenia určené pre skladovanie rádioaktívnych odpadov nevynímajúc. Je to jedným z dôvodov pre zavádzanie rôznych korózných monitorovacích programov. Jedným z takých programov je aj program overovacích vzoriek, ktorý má pomôcť monitorovať jednotlivé časti prevádzkovaných zariadení priamo v reálnom prostredí, v ktorom sa zariadenie používa.

V príspevku sú uvedené zaznamenané zmeny vlastností a parametrov overovacích vzoriek z korózneho programu, ktorý bol navrhnutý a realizovaný spoločnosťou VUJE, a.s. Príspevok popisuje zmeny v parametroch vzoriek pre sledovanie hmotnostných úbytkov v celom období realizácie tohto projektu. Vzorky pre sledovanie hmotnostných úbytkov boli umiestnené priamo vo vnútri nádrží, ktoré sa používali pre skladovanie kvapalných rádioaktívnych odpadov (KRAO) a boli tak priamo vystavené pôsobeniu tohoto druhu média. Primárne bola sledovaná rýchlosť korózie na vnútornej výstelke skladovacej nádrže. V príspevku sú zhrnuté všetky výsledky získané v priebehu projektu, teda za obdobie od roku 2013 do roku 2021.

Abstract

The corrosion resistance of the operating components of all nuclear facilities and facilities intended for the storage of radioactive waste including is one of the essential requirements for long-term and safe operation. It is also the reason for the implementation of various corrosion programs. One such program is the surveillance specimen program, which is intended to monitor the individual parts of the equipment being operated in the given environment directly in which the equipment is used.

The paper presents the detected changes in the properties and parameters of the surveillance samples from the corrosion program that was designed and implemented by VUJE, a.s. The paper describes the changes in the parameters of the corrosion coupon samples for weight loss monitoring throughout the entire period of project implementation. The corrosion coupon samples for the mass loss monitoring were placed directly inside the tanks that were used for the storage of liquid radioactive wastes (LRAW) and were thus directly exposed to this type of medium. The corrosion rate on the inner lining of the storage tanks was primarily monitored. The paper summarizes all results obtained during the project, i.e., for the period from 2013 to 2021.

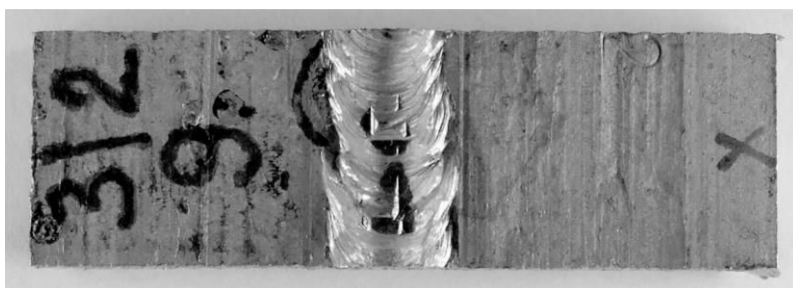
Úvod

Odolnosť prevádzkovaných komponentov proti korózii je dôležitou podmienkou pre dlhodobú a bezpečnú prevádzku všetkých jadrových zariadení. Rovnakú podmienku musia spĺňať aj zariadenia určené pre skladovanie rádioaktívnych odpadov. K týmto zariadeniam patrili aj podzemné nádrže pre skladovanie KRAO. Nachádzali sa v areáli jadrovej elektrárne (JE) A1 v Jaslovských Bohuniciach. Tieto skladovacie nádrže boli vyrobené z betónu ešte v roku 1967. Boli valcového tvaru a vnútro mali obložené výstelkou, ktorá bola vyrobená z austenitickej chróm-niklovej nehrdzavejúcej ocele stabilizovanej titánom (STN 417246). V čase ich výroby neboli vôbec špecifikované požiadavky na kvalitu a bezpečnosť. Z tohto dôvodu boli nádrže v roku 1994, v súlade s vyhláškou ČSKAE č. 436/90, zaradené do bezpečnostnej triedy 3 vybraných jadrovo-energetických zariadení. Potom nasledovalo vypracovanie plánov kvality, ktoré zahŕňali aj rozsah defektoskopických kontrol vnútornej výstelky a ich periodicitu. Tá bola určená na 4 roky [1].

Počas nedeštruktívnych kontrol (NDT) výsteliek nádrží sa preukázala ich vysoká úroveň kvality a odolnosti. Tieto výsledky prispeli k úvahám o predĺžení času medzi intervalmi NDT kontrol, no zároveň bolo potrebné zachovať všetky bezpečnostné aspekty. Snahou bolo najmä predchádzať vzniku nových KRAO a zabrániť zbytočnému manipulovaniu s už jestvujúcim KRAO, ktoré sa už v nádržiach nachádzalo. Všetky tieto podmienky pomohol naplniť korózný program, ktorý bol založený na monitorovaní stavu výstelky nádrží pomocou kompaktných overovacích vzoriek [2].

V roku 2013 bol do skladovacej nádrže s označením N1/3 vložený monitorovací systém s prvou kompletnou náplňou porovnávacích vzoriek. V tejto nádrži bol monitorovací systém uložený do leta roku 2015. V tomto roku bol monitorovací systém presunutý do nádrže N1/2, kde zostal až do augusta 2021. Dôvodom presunutia monitorovacieho systému bola príprava na pravidelnú NDT kontrolu nádrže N1/3. V roku 2022 bola plánovaná likvidácia týchto skladovacích nádrží.

V príspevku je uvedený stručný popis korózneho programu, ako aj výsledky z vyhodnocovania vzoriek určených pre sledovanie hmotnostných úbytkov. Hlavným cieľom vyhodnocovania tohto typu vzoriek bolo zistiť úbytok hmotnosti a objemu materiálu z výstelky, za obdobie ôsmich rokov expozície v prostredí KRAO, a vyhodnotiť tak odolnosť použitého materiálu STN 417246 voči tomuto prostrediu.



Obr. 1: Jeden z použitých segmentov monžíka, použitého na výrobu vzoriek

Podmienky experimentu

V podzemných skladovacích nádržiach KRAO sa od ich uvedenia do prevádzky zachytávali rôzne druhy kalov a kvapalných odpadov, ktoré pochádzali prevažne z prevádzky JE A1. Bola to zmes rôznych chemických zlúčenín od čistiacich a dekontaminačných prostriedkov, až po organické zvyšky a pod. Prostredie, ktoré tieto kaly, chemikálie a kvapaliny vytvorili, bolo veľmi agresívne. Zistila sa aj prítomnosť prvkov, ktoré za určitých podmienok môžu byť pre

dlhodobú životnosť kovových komponentov veľmi nebezpečné. Boli to napríklad prvky ako Na, K, Ca, Cl, O, S, P.

Najdôležitejším krokom pri príprave monitorovacieho systému bolo získanie vhodného materiálu pre výrobu vzoriek. Materiál by mal reprezentovať referenčný stav reálnych častí nádob. Okrem toho, že materiál by mal mať rovnaké chemické zloženie, bolo dôležité, aby mal aj približne rovnakú prevádzkovú históriu. Tieto podmienky splňali materiály zo zlikvidovaných monžíkov (Obr. 1). Tie sa pôvodne používali na prečerpávanie kalov z nádrže N3, ktorá bola už v tom čase demontovaná; a rovnako aj z nej sa využil materiál pre výrobu vzoriek.

Tieto získané materiály boli podrobené skúškam mechanických vlastností, metalografickými skúškami, ako aj skúške odolnosti proti medzikryštálovej korózii. Týmto skúškami bola overená vhodnosť materiálov pre ich použitie na výrobu porovnávacích vzoriek. Rovnako sa pomocou nich získal počiatočný, tzv. nulový stav, ktorý sa neskôr použil pri porovnávaní získaných výsledkov.

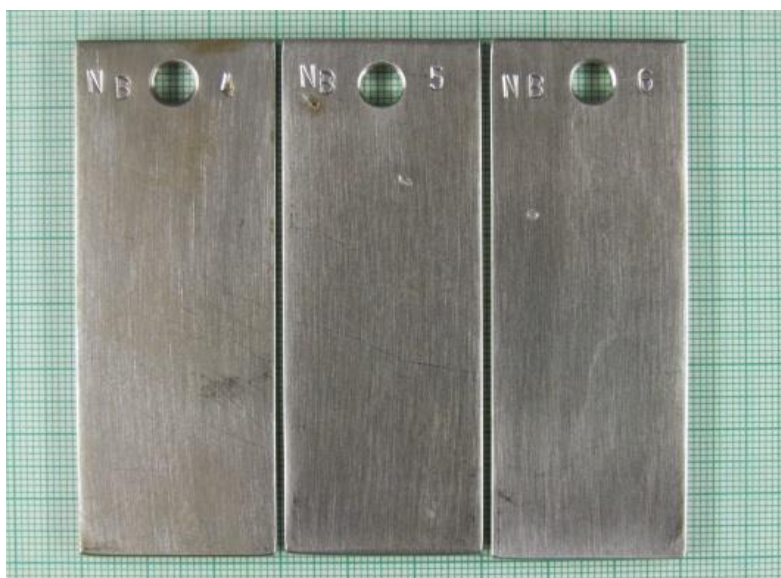
V rámci navrhnutého monitorovacieho programu korózie boli použité tri druhy vzoriek:

- vzorky pre sledovanie štrbinovej korózie,
- vzorky pre sledovanie korózneho praskania pod napätím, tzv. U-bendy,
- vzorky pre sledovanie hmotnostných úbytkov (Obr. 2).

Pre každý z použitých druhov vzoriek sa použili tri typy materiálu:

- základný materiál z monžíkov (označenie na vzorkách MB),
- základný materiál z nádrže N3 (označenie na vzorkách NB),
- materiál obsahujúci zvarový kov spolu s tepelne ovplyvnenou zónou (označenie na vzorkách MW).

Vzorky sa následne rozdelili na dve skupiny. Prvá skupina bola určená pre krátkodobé sledovanie zmien, kedy sa vzorky vyhodnocovali s ročnou periodicitou. Druhá skupina vzoriek bola určená pre monitorovanie so štvorročnou periodicitou hodnotenia.



Obr. 2: Vzorky pre sledovanie hmotnostných úbytkov – základný materiál z nádrže N3

Pred ich prvým umiestnením do nádrže KRAO v roku 2013 boli všetky vzorky pre sledovanie hmotnostných úbytkov odvážené na laboratórnych analytických váhach. Tieto hmotnosti sú uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Počiatočné hmotnosti vzoriek z roku 2013

Vzorka	MB 1	MB 2	MB 3	MW 1	MW 2	MW 3	NB 1	NB 2	NB 3
Hmotnosť [g]	40,5884	42,5890	50,9324	56,5749	57,5661	54,5894	39,3817	42,4750	40,6215
Vzorka	MB 4	MB 5	MB 6	MW 4	MW 5	MW 6	NB 4	NB 5	NB 6
Hmotnosť [g]	38,5549	51,7980	45,1598	57,1825	56,9671	55,7454	39,7557	40,9521	41,7385

V lete roku 2014 nasledovalo prvé váženie vzoriek MB 4-6, MW 4-6 a NB 4-6. Pred samotným vážením boli vzorky podrobené viacnásobnému ultrazvukovému a mechanickému čisteniu. Následne sa vzorky vysušili.

Avšak v roku 2015 sa musel monitorovací systém presunúť do vedľajšej nádrže. Dôvodom bolo vykonávanie plánovaných kontrol v aktuálnej nádrži. Presunutie nemalo žiadny vplyv na výsledky ďalších analýz. Z tohoto dôvodu mohlo čistenie a váženie krátkodobých vzoriek pokračovať každý rok bez prerušenia až do leta v roku 2017.

V tomto roku boli prvý raz vybrané aj vzorky pre dlhodobé hodnotenie hmotnostných úbytkov. Boli to vzorky MB 1-3, MW 1-3, NB 1-3. Postup očistenia a vysušenia vzoriek pred vážením zostal zachovaný, ako pri krátkodobom sledovaní vzoriek, aby nedošlo ku skresleniu výsledkov. Rovnako sa postupovalo aj v ďalších rokoch, až do augusta roku 2021. Vtedy sa vzorky čistili a hodnotili posledný krát.

Výsledky a diskusia

Každý rok boli zaznamenané a vyhodnocované hmotnosti vzoriek pre krátkodobé hodnotenie (MB 4-6, MW 4-6, NB 4-6). Pri nich sa získalo, vrátane počiatočnej hmotnosti, deväť záznamov (roky 2013–2021). Pri vzorkách pre dlhodobé sledovanie a hodnotenie hmotnosti (MB 1-3, MW 1-3, NB 1-3) sa spolu získali tri záznamy (roky 2013, 2017, 2021).

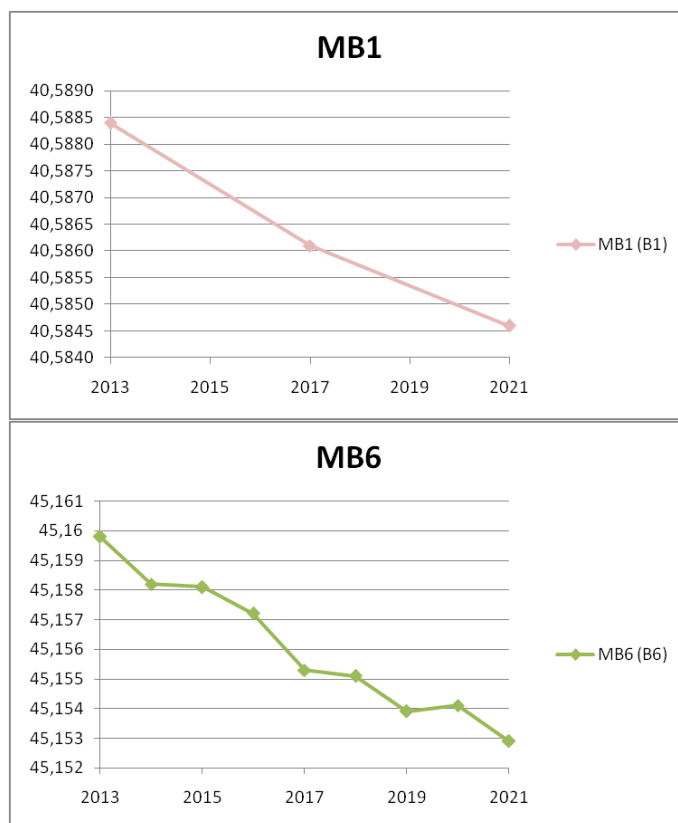
Hmotnostné úbytky, alebo prírastky, boli stanovené odčítaním získanej hmotnosti z predchádzajúceho roku od hmotnosti získanej v aktuálnom roku.

Tab. 2 Zaznamenané hmotnostné úbytky za roky 2013-2021

Úbytok hmotnosti [g]									
Vzorka	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Ø úbytok/rok
MB 1	-	-	-	0,0023	-	-	-	0,0015	0,0005
MB 2	-	-	-	0,0018	-	-	-	0,0005	0,0003
MB 3	-	-	-	0,0011	-	-	-	0,0005	0,0002
MW 1	-	-	-	0,0006	-	-	-	0,0011	0,0002
MW 2	-	-	-	0,0001	-	-	-	0,0008	0,0001
MW 3	-	-	-	0,0010	-	-	-	0,0011	0,0003
NB 1	-	-	-	0,0036	-	-	-	-0,0003	0,0004
NB 2	-	-	-	0,0015	-	-	-	0,0001	0,0002
NB 3	-	-	-	0,0021	-	-	-	0,0003	0,0003
MB 4	0,0008	0,0002	0,0003	0,0017	0,0013	0,0003	-0,0005	0,0008	0,0006
MB 5	0,0013	0,0007	0,0000	0,0007	0,0008	0,0004	-0,0003	0,0006	0,0005
MB 6	0,0016	0,0001	0,0009	0,0019	0,0002	0,0012	-0,0002	0,0012	0,0009
MW 4	0,0002	0,0002	0,0003	0,0008	0,0011	0,0003	0,0004	0,0013	0,0006
MW 5	0,0002	0,0005	0,0000	0,0014	0,0008	0,0005	0,0007	0,0016	0,0007
MW 6	0,0008	0,0005	0,0000	0,0013	0,0014	0,0005	0,0003	0,0004	0,0007
NB 4	0,0000	0,0014	0,0028	0,0010	0,0007	0,0005	0,0011	-0,0008	0,0008
NB 5	0,0001	0,0010	0,0008	0,0011	0,0019	0,0003	0,0004	-0,0009	0,0006
NB 6	0,0000	0,0006	0,0002	0,0009	0,0003	0,0006	0,0007	-0,0009	0,0003

Priemerná hodnota hmotnostných úbytkov sa pri vzorkách pre krátkodobé sledovanie pohybovala v intervale od 0,0003g do 0,0009g za rok (celková priemerná hodnota na rok bola 0,0006g). Pri vzorkách pre dlhodobé hodnotenie to bolo intervale od 0,0001g do 0,0005g (celková priemerná hodnota na rok bol 0,0003g). Všetky zmeny hmotností vzoriek, zaznamenané počas celého sledovaného obdobia sú uvedené v Tab. 2. Vzhľadom na maximálnu prípustnú ročnú zmenu hmotnosti 0,0041g možno konštatovať, že monitorovaný materiál výstelky bazénov pre skladovanie KRAO dosahoval vysoký stupeň odolnosti voči korózii.

Ako je možné vidieť z hodnôt uvedených v tabuľke, tak pri každoročnom čistení vzoriek pre krátkodobé hodnotenie dochádzalo k narúšaniu ochrannej vrstvy oxidov. Táto jemná vrstva sa vždy po jej narušení zregenerovala potom, ako boli vzorky opätovne vystavené prostrediu KRAO v nádrži. Jej častá regenerácia (reagovanie s prostredím, najmä s prítomným kyslíkom) urýchlila ubúdanie materiálu v porovnaní so vzorkami pre dlhodobé sledovanie. Je to dobre vidieť aj na grafickom znázornení vývoja úbytkov hmotnosti uvedenom na Obr. 3.



Obr. 3 Grafické znázornenie úbytkov hmotnosti:

Vzorka hore MB1 – dlhodobé sledovanie

Vzorka dolu MB6 – krátkodobé sledovanie

Záver

Na základe predložených zistení možno povedať, že napriek absencii špeciálnych kritérií pre zaručenie bezpečnosti prevádzky podzemných nádrží, vtedajší dodávatelia nepodcenili dôležitosť vnútornej ocelevej výstelky a vybrali veľmi vhodný a korózne vysoko odolný materiál.

U oboch skupín vzoriek použitých na hodnotenie hmotnostných úbytkov sa preukázala veľmi dobrá chemická odolnosť. Pri vzorkách, ktoré boli hodnotené raz za 4 roky možno povedať, že pri porovnaní so vzorkami hodnotenými každý rok, bola rýchlosť ubúdania

materiálu o polovicu pomalšia. Priemerný ročný úbytok na hmotnosti vzoriek pre krátkodobé vyhodnotenie dosahoval 0,0006 g/rok. Naproti tomu pri vzorkách, ktoré sa vyhodnocovali raz za štyri roky to bola zmena hmotnosti v priemere o 0,0003 g/rok.

Ďalším zistením bolo, že žiadna z vyhodnotených vzoriek počas obdobia ôsmich rokov existencie monitorovacieho systému nedosiahla maximálne prípustnú zmenu hmotnosti v úbytku, čiže 0,0041g/rok. Z toho vyplýva, že navrhnutý a prevádzkovaný monitorovací korózný program výraznou mierou prispel k úspore časových a finančných prostriedkov spoločnosti JAVYS, a.s., ktorá prevádzkovala a likvidovala tieto podzemné nádrže pre skladovanie KRAO. Ak by nedošlo ku vývoju daného monitorovacieho systému, tak by sa museli nádrže prečerpávať, čistiť a v pravidelných ročných intervaloch podrobovať detailným meraniam na stenách konkrétnych nádob KRAO. To by výrazne predĺžilo a predražilo ich likvidáciu.

Literatúra

- [1] HOLICKÁ, Z., *Koncepcia nakladania s KRAO z podzemných nádrží obj. 44/10*. Technická správa, Ev. Č.: VUJE-A1_IIúVO-HVB 2.1.6./SPR/VUJE/11/00
- [2] KUPČA, L. a kol., *Návrh programu monitorovania materiálu austenitickej výstelky nádrží pre dlhodobé skladovanie kvapalných rádioaktívnych odpadov (KRAO)*, technická správa VUJE ev. č.: 0360/18/2011 vydané 27.07.2011

HODNOCENÍ DEGRADACE BETONŮ V JE VLIVEM H_3BO_3

THE EVALUATION OF CEMENT CONCRETE DEGRADATION IN NUCLEAR POWER PLANT DUE TO H_3BO_3

Filip Sedlák a Michaela Joanidisová

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Hlavním cílem projektu je zhodnocení vlivu dlouhodobého kontaktu konstrukčního betonu bazénů skladování vyhořelého paliva (BSVP) s drenážním roztokem BSVP a jeho vliv na mechanické vlastnosti betonu pro JE Dukovany a JE Temelín.

Abstract

The main goal of the project is to evaluate the long-term exposure of the structural cement concrete of spent fuel pools (BSVP) with drainage solution of BSVP and its effect on mechanical properties of the cement concrete for NPP Dukovany and NPP Temelín.

Úvod

Pro zjištění a zhodnocení vlivu dlouhodobého kontaktu konstrukčního betonu BSVP s drenážním roztokem BSVP (vodný roztok kyseliny borité 15 g/l) byly vyrobeny zkušební vzorky betonů podle receptury odpovídající materiálům použitých při výstavbě BSVP. Výsledky průběžného hodnocení jsou shrnuty v rámci technických zpráv [1, 2]. Výsledky z hodnocení vlivu kyseliny borité na vlastnosti betonu bude možné použít jako vstupní data v případě zaznamenaných únicích pro hodnocení vlivu na dlouhodobý bezpečný provoz BSVP po celou dobu životnosti JE (LTO).

Experimentální plán

Zkoušené materiály

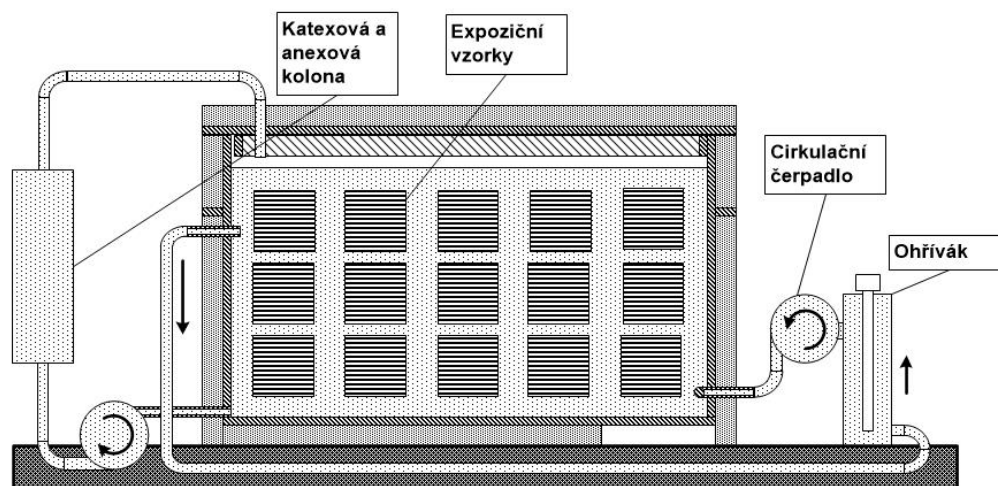
Pro expoziční zkoušky byl zvolen krychlový typ zkušební vzorku s délkou hrany 150 mm (krychlový typ je ve zkušebnictví nejrozšířenější a je optimální variantou z hlediska poměru velikost / relevance výsledků).

Pro *JE Dukovany* byl z materiálového hlediska vybrán konstrukční beton o objemové hmotnosti suchého zatvrdělého betonu 2 300 kg/m³, který odpovídá závaznému technologickému předpisu č. 61/b III.

Pro *JE Temelín* byl z materiálového hlediska vybrán konstrukční beton třídy B20 včetně betonu biologické ochrany o objemové hmotnosti do 2350 kg/m³ s požadavkem ochrany obsluhy nebo vnějšího prostředí a těžký beton třídy B28 (stěny BSVP).

Experimentální testovací zařízení

Pro expozici zkušebních těles v prostředí s kontinuální regenerací korozního média (modelování průniku do meziprostoru drenážní sekce dvojité oblicované bazény velkou trhlínou) byly vyrobeny dvě expoziční nádrže. Další dvě nádrže byly vyrobeny pro expozici vzorků v statickém prostředí korozního média (modelování mrtvých objemů v meziprostoru drenážních sekcí dvojité oblicované bazény). Expoziční nádrže jsou tepelně zaizolovány a vybaveny víkem, které zabraňuje nadměrnému odparu vody a kontaminaci z okolí. Základní schéma expoziční nádrže (typ s regenerací korozního média) je na Obr 1. Kromě sad vzorků exponovaných v prostředí s kontinuální regenerací média a vzorků exponovaných ve statickém prostředí byly připraveny i sady referenčních těles, uložených v boxech s prostředím o 100% vzdušné vlhkosti (vzorky uložené v plastových boxech nad vodní hladinou a při laboratorní teplotě).



Obr. 1: Schéma expoziční nádrže s regenerací média pro zkoušky koroze betonu

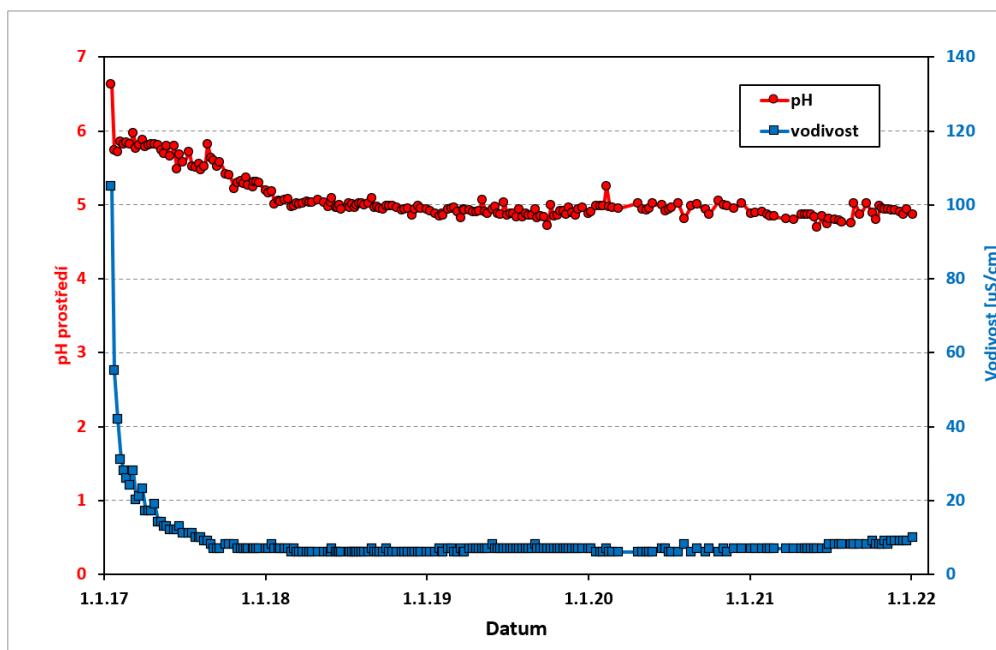
Metodika hodnocení

Všechny zkoušky na exponovaných vzorcích jsou prováděny akreditovanou laboratoří společnosti *Výzkumný ústav pozemních staveb – Certifikační společnost, s.r.o. Praha*. V akreditované laboratoři se provádí *stanovení pevnosti v tlaku* podle ČSN EN 12 390-3.

Průběžné výsledky experimentu

Průběh hodnot expozičních parametrů

Chemismus prostředí je kontrolován periodickým měřením vodivosti a pH roztoku, a to v místě za katexovou kolonou, za anexovou kolonou a v nádrži. Vzorky na stanovení obsahu kyseliny borité jsou odebírány pouze namátkově. Průběh hodnot pH a vodivosti expozičního roztoku za sledované období je znázorněn v grafu na Obr. 2.



Obr. 2: Průběh hodnot pH a vodivosti korozního prostředí

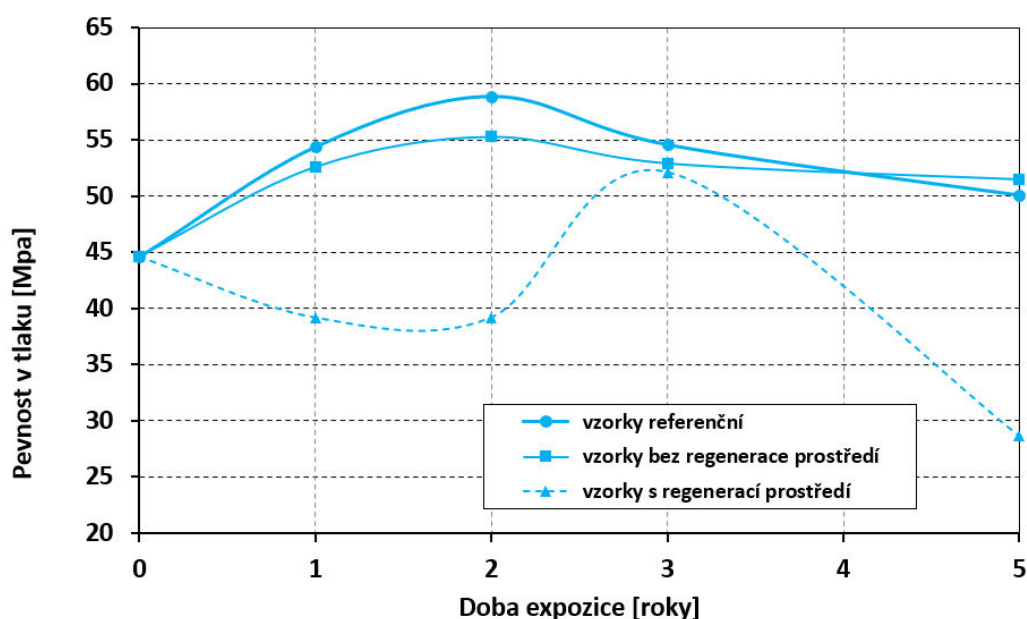
V průběhu sledovaného období docházelo k poklesu hodnot sledovaných parametrů (vodivost a pH) korozního prostředí úměrně ke klesající rychlosti výměny iontů mezi roztokem a materiálem vzorků. Na konci prvního roku expozice byla už hodnota vodivosti roztoku prakticky stabilní a rychlost poklesu pH minimální. Výměna média v nádrži byla provedena

dne 17.1.2019, 17.1.2020, 17.1. 2021 a 17.1.2022. Teplota korozního média v nádrži byla v průběhu sledovaného období, kromě několika krátkých poklesů zaviněných výpadkem elektrického proudu, konstantní na hodnotě 40 ± 0.1 °C. Pokles teploty během výpadku topení nebyl větší než 10 °C po dobu několika hodin.

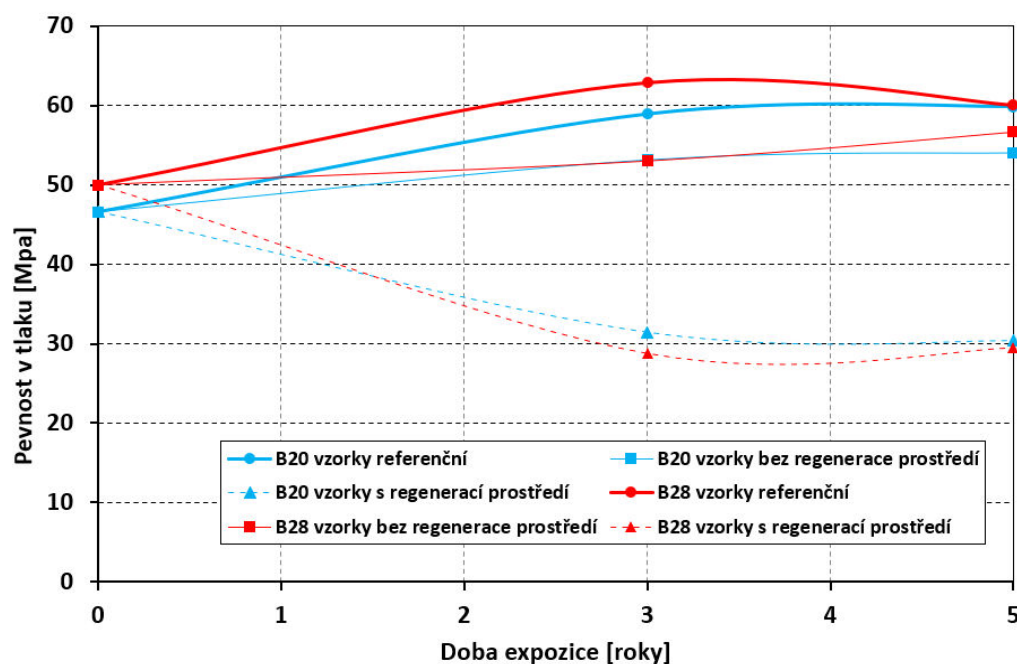
U nádrže provozované ve statickém režimu se pH roztoku kyseliny borité stabilizovalo na hodnotě kolem pH 8 a je prakticky stabilní. Výměna média byla provedena vždy po každých 12 měsících expozice (po odběrech zkušebních vzorků).

Výsledky stanovení pevnosti v tlaku

Zkoušky byly provedeny podle normy ČSN EN 12390-3. Výsledky znázorňují Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3: Průběh hodnot pevnosti v tlaku exponovaných vzorků betonů pro JE Dukovany



Obr. 4: Průběh hodnot pevnosti v tlaku exponovaných vzorků betonů pro JE Temelín

Hodnocení

Mechanické zkoušky na exponovaných vzorcích prozatím prokázaly předpokládaný průběh charakteristik. V případě vzorků exponovaných v prostředí s průběžnou regenerací došlo po pěti letech expozice ke zřetelnému poklesu pevnosti v tlaku (Obr. 2 a Obr. 3). U vzorků exponovaných ve statickém režimu došlo k předpokládanému nárůstu pevnosti vlivem zrání, kdy tento nárůst byl jen mírně ovlivněn degradačními procesy (reakcí cementového tmelu a kameniva s roztokem kyseliny borité). Podrobnější analýza průběhu pevnostních charakteristik bude možná až po delší době expozice a po vyjmutí většího počtu vzorků.

Závěr

Průběžné výsledky doposud prokázaly předpokládaný průběh hodnot sledovaných parametrů. U vzorků exponovaných v prostředí s průběžnou regenerací (simulace korozního procesu přímo v lokalitě průniku média oblicovkou – maximálně konzervativní podmínky) došlo po pěti letech expozice k poklesu pevnosti na cca 55-65 % původní pevnosti.

U vzorků exponovaných ve statickém režimu (simulace korozního procesu v místě statické expozice s minimální výměnou) došlo po pěti letech expozice k nárůstu pevnosti na cca 110-120 % původní pevnosti.

U referenčních vzorků došlo po pěti letech k nárůstu pevnosti na cca 120-130 % původní pevnosti.

Podrobné hodnocení výsledků bude možné až po získání většího množství experimentálních dat, tedy vyjmutí alespoň tří sad exponovaných vzorků.

Literatura

- [1] KÁRNÍK, Dalibor; SEDLÁK, Filip. *Expoziční zkoušky koroze betonů bazénu vyhořelého paliva v EDU*. Řež, duben 2022, technická zpráva, DITI 3202_849
- [2] KÁRNÍK, Dalibor; SEDLÁK, Filip. *Expoziční zkoušky koroze betonů bazénu vyhořelého paliva v ETE*. Řež, březen 2022, technická zpráva, DITI 3202_850

VÝZKUMNÉ AKTIVITY V OBLASTI CHEMIE CHLADIVA PRO SYSTÉMY S OXIDEM UHLÍČITÝM S NADKRITICKÝMI PARAMETRY (SCO₂)

SCO₂ COOLANT CHEMISTRY RESEARCH ACTIVITIES

Jan Berka ^{a)}, Otakar Frýbort ^{a)}, Alice Vagenknechtová ^{b)}, Tomáš Hlinčík ^{b)}, Eliška Purkarová ^{b)} a Jakub-Vojtěch Ballek ^{b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o., Husinec-Řež, Hlavní 130, 250 68 Řež

^{b)} Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 1905, 166 28 Praha 6 - Dejvice

Abstrakt

Energetické cykly využívající jako pracovní médium oxid uhličitý v nadkritickém stavu (sCO₂) se vyznačují – v porovnání s parními cykly – vyšší účinností přeměny tepelné energie na energii elektrickou. Dalším jejich benefitem jsou kompaktnější rozměry klíčových komponent energetického cyklu, především turbíny. Energetické cykly s sCO₂ lze využít v jaderné i nejaderné energetice, např. v sekundárních okruzích pokročilých jaderných reaktorů, v klasických elektrárnách nebo ve výrobnách využívajících odpadní teplo, atd. Vzhledem k uvedeným perspektivám je na tyto energetické cykly zaměřena celá řada výzkumných aktivit. Část těchto aktivit je zaměřena na chemii, čištění a kontrolu čistoty pracovního média na bázi CO₂, konstrukční materiály a jejich odolnost atd. V příspěvku budou prezentovány aktuální výsledky a poznatky týkající se zmíněné problematiky.

Abstract

Supercritical carbon dioxide (sCO₂) power cycles are characterized by enhanced efficiency in heat to electricity conversion. Another advantage is the compact size of the components of the cycle (e.g., turbine). SCO₂ power cycles can be used in both nuclear and non-nuclear energy, e.g., for the secondary circuit of advanced nuclear reactors (GEN IV), for the generation of power from waste heat, etc. Due to the perspectives of sCO₂ power cycles number of research activities are related to them. Some of these activities are aimed at sCO₂ medium chemistry and resistance of materials in the sCO₂ environment. The selection of new results of mentioned activities achieved in Czech research organizations is presented in the paper.

Úvod

Využití energetického okruhu s oxidem uhličitým v nadkritickém stavu (sCO₂) představuje jednu z cest dosažení vyšší účinnosti při konverzi tepelné energie na energii elektrickou. Navíc v porovnání s energetickými zařízeními využívající „klasický“ parní cyklus využití sCO₂ umožňuje zmenšení některých komponent zařízení, typicky turbíny [1,2]. SCO₂ energetické cykly mohou pracovat v širokém rozmezí teplot, typicky 350–700 °C [2], teoreticky je ale lze provozovat při vyšších i nižších teplotách (oxid uhličitý je v nadkritickém stavu při teplotě a tlaku vyšších než 30,98 °C@7,32 MPa). Horní limit představuje životnost konstrukčních materiálů. Využití sCO₂ okruhy pro konverzi tepelné energie na elektrickou energii lze jak v jaderných elektrárnách včetně pokročilých jaderných reaktorů generace IV., tak i v dalších zdrojích zahrnujících spalování fosilních i alternativních paliv, využití solární energie nebo odpadního tepla. Některé výroby využívající fosilní paliva mohou být uspořádány jako „direct sCO₂“, ve kterých je v cyklu využíván CO₂ vzniklý spalováním (více informací viz citace [2]).

Na energetické cykly s sCO₂, co by perspektivní technologii v energetice, se váže celá řada výzkumných aktivit, často na mezinárodní úrovni. Na těchto aktivitách se podílejí i výzkumné organizace, vysoké školy i průmyslové podniky z ČR. Zaměření těchto aktivit je velmi pestré, např. aplikace sCO₂ cyklu pro různá využití, fyzikální chování sCO₂ a termohydraulika, matematické modelování chování média, v neposlední řadě také vliv sCO₂ na korozi a odolnost

konstrukčních materiálů, chemie, čistota a kontrola čistoty média na bázi sCO₂. Zejména posledně jmenované výzkumné aktivity v současnosti probíhají ve spolupráci organizací Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) a Vysoké školy chemicko-technologické v Praze (VŠCHT).

Chemie média na bázi sCO₂

Chemické složení pracovního média a obsah zejména některých druhů příměsí v tomto médiu může mít zásadní vliv na životnost a spolehlivost energetických zařízení. V porovnání s ostatními energetickými systémy (zejména s paro-vodní klasikou) nebylo nalezeno v odborné literatuře příliš mnoho publikací věnovaných problematice chemie pracovního média na bázi sCO₂. Obsah a zastoupení příměsí v médiu závisí na několika faktorech, mimo jiné na kvalitě výchozího plynu, typu a stavu energetického zařízení (a s tím souvisejících průniků vzduchu nebo dalších médií do okruhu), typu cyklu (přímý nebo nepřímý ohřev), atd. V případě cyklu s nepřímým ohřevem, který je běžnější, může sCO₂ obsahovat kyslík, vodu (vodní páru), vodík, oxid uhelnatý, metan, dusík, popř. organické látky. Obsah těchto příměsí se zpravidla pohybuje v nízkých objemových zlomcích, typicky pod 1 % obj. V případě cyklu s přímým ohřevem („direct“) do pracovního média vstupují ještě některé složky spalin, např. oxidy dusíku a obsahuje-li palivo síru, pak i oxidy síry. Objemové zlomky příměsí v médiu jsou v tomto případě obvykle vyšší, mohou dosáhnout řádu jednotek i desítek objemových procent. V takovém případě může přítomnost příměsí ovlivnit i účinnost energetického cyklu [2, 3].

V zařízeních s cyklem s nepřímým ohřevem (což je běžnější uspořádání) lze obsah nežádoucích příměsí v médiu eliminovat použitím vstupního plynu o vysoké čistotě, zamezením průniků příměsí z okolí údržbou okruhu a dalšími běžnými opatřeními. Z korozního hlediska je třeba v tomto případě věnovat pozornost zejména obsahu vlhkosti (vody), popř. kyslíku v okruhu s oxidem uhličitým. Více podrobností lze zjistit v citaci [3].

Metody analytické kontroly čistoty sCO₂ média

Pro analytickou kontrolu sCO₂ média lze využít různé metody. Záleží na konkrétních požadavcích, tj. jaké složky mají být prioritně sledovány, jaké jsou obvyklé objemové zlomky (koncentrace) těchto složek v médiu nebo s jakou frekvencí má monitorování probíhat atd. Výzkumné aktivity v této oblasti jsou v první řadě zaměřeny na analytickou kontrolu média v sCO₂ experimentální smyčce v CV Řež (podrobnosti o tomto zařízení viz citace [3]) s možným pozdějším transferem na další sCO₂ technologie.

Techniky analytické kontroly mohou být založeny na odběru vzorku ze vzorkovacího místa smyčky, vzorek je poté buď transportován do laboratoře a tam analyzován a nebo je analyzován na místě – vzorkovací místo je přímo spojeno s analytickým přístrojem. Při odběru dochází k redukci tlaku vzorku a snížení teploty na podkritické parametry. Při zkušebních odběrech z experimentální smyčky bylo pozorováno ochlazování až zamrzání odběrového místa v důsledku Jouleova-Thomsonova efektu. To může ovlivnit složení odebraného vzorku. Aby byl tento jev eliminován, byla zkonstruována vyhřívaná odběrová trať s redukcí tlaku ve třech stupních (12,5 MPa na 7 MPa v prvním stupni, ze 7 na 2 MPa na 2. stupni a ze 2 MPa na cca 1 kPa na 3. stupni).

Pro stanovení jednoduchých sloučenin uvedených v předchozí kapitole lze využít plynový chromatograf heliově-ionizačním detektorem (GC-HID) a mikronáplňovou kolonou. Tato konfigurace je již v CVŘ využívána pro heliové technologie, podrobnosti viz citace [4, 5]. Chromatografická metoda ale musí být optimalizována pro analýzu vzorku v matici CO₂, aby nedošlo k zahlcení detektoru a minoritní složky bylo možné detekovat. Řešením může být obrácení toku analytu v soustavě před tím, než se pás CO₂ dostane na detektor. Metoda byla testována na standardní směsi obsahující H₂, O₂, N₂, CH₄, acetylen a CO (každá z látek v objemovém zlomku 0,01 obj. %, tj. 100 vppm) v matici CO₂. Na výsledném chromatogramu

došlo k dostatečnému oddělení elučních pásů („píků“) všech uvedených látek s výjimkou acetyleny. Optimalizace a příprava aplikace metody pro monitorování čistoty média při provozu experimentální smyčky pokračuje.

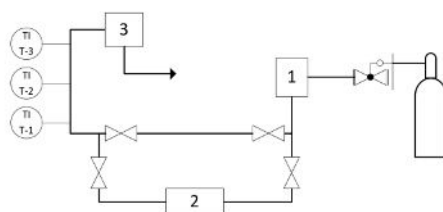
Pro monitorování vlhkosti nejsou metody založené na plynové chromatografii vhodné. Pro tento účel lze využít speciální spektrometry (hygrometry), kterých je na trhu více druhů. Pro využití v heliových technologiích se osvědčil optický hygrometr pracující na principu změny vlnové délky infračerveného paprsku. Metoda je přesná především pro stanovení stopových zlomků vlhkosti od cca 0,0001 obj. % (1 vppm). Více podrobností o metodě je uvedeno v citacích [4, 5]. Výhodou spektrometru je umístění sondy přímo v médiu bez nutnosti odběrů. Sestavu hygrometru je ale třeba konfigurovat pro monitorování vlhkosti v prostředí CO₂. Mimo jiné je možné použít sondy pro tlak až do 20 MPa (běžně dodávané jsou do 10 MPa). Ovšem ani tento přístroj není vhodný pro monitorování vlhkosti v CO₂ v nadkritické oblasti. Výrobce doporučuje v místě sondy snížit tlak pod 5 MPa a teplotu udržovat v rozmezí 10–40 °C. Sonda sice vydrží tlak 20 MPa (testována je při 25 MPa) a teplotu 70 °C, ale přesnost měření při nadkritických podmínkách nelze garantovat. Aktivitu zaměřenou na monitorování čistoty sCO₂ média pokračují, mimo jiné probíhá přestavba konfigurace GC-HID pro monitorování čistoty média v technologické smyčce, plánované je také testování funkčnosti zmíněného hygrometru. Proběhl také experiment zaměřený na stopové organické látky v sCO₂ během dlouhodobého provozu experimentální smyčky (viz cit. [3]).

Čištění CO₂ v energetických aplikacích

O této problematice nebylo v odborné literatuře nalezeno příliš mnoho informací. Lze nalézt zmínky o mechanických a olejových filtrech, popř. stručné informace týkající se čištění CO₂ v jaderných elektrárnách využívající toto médium jako chladivo primárního okruhu (v tomto případě ale nejde o sCO₂) [3, 6]. Výzkumné aktivity v této oblasti se v současnosti zaměřují na separaci vlhkosti z CO₂ metodami založenými na adsorpci. Jak bylo uvedeno, vlhkost patří z korozního hlediska mezi nejvýznamnější nečistoty (pokud jde o okruh s nepřímým ohřevem, kde lze očekávat plyn vysoké čistoty). Experimenty v této fázi probíhají v laboratorním měřítku, cílem experimentů je zjištění klíčových parametrů (konkrétně kapacit) vytypovaných adsorbentů. Na základě výsledků laboratorních testů bude navržena separační jednotka pro experimentální sCO₂ smyčku.

Byly testovány vybrané adsorpční materiály za účelem odstraňování vlhkosti z plynu. Byly změřeny adsorpční kapacity adsorbentů při různých koncentracích vlhkosti v nosném plynu. Dále bylo provedeno porovnání adsorpčních kapacit v závislosti na použitém nosném plynu (dusík a oxid uhličitý). Experimenty byly provedeny na aparatuře, jejíž schéma je na Obr. 1. Nosný plyn byl sycen v generátoru vlhkosti (1) na požadovaný rosný bod. Následně plyn proudil do adsorbéru (2), kde byly testovány jednotlivé adsorbenty. Měření rosného bodu vody bylo prováděno za adsorbérem. Rosný bod vody byl měřen pomocí tří analyzátorů, které pracovaly na rozdílném principu. Jednalo se o analyzátor s chlazeným zrcátkem, dále kapacitní vlhkoměr a analyzátor pracující na principu posunu vlnové délky infračerveného paprsku. Pro testování zachytu vlhkosti byly vybrány tyto typy adsorbentů: molekulové síto 13 X, silikagel a aktivní uhlí SC 40. Na základě testů byly získány následující poznatky:

V případě silikagelu jeho adsorpční kapacita výrazně klesala s nižším obsahem vlhkosti v plynu. Na druhou stranu molekulové síto 13X vykazovalo dobrou adsorpční schopnost při všech měřených koncentracích vlhkosti. Jeho adsorpční kapacita klesala s klesajícím obsahem vlhkosti jen pozvolna. Uhlíkatý materiál, tedy aktivní uhlí SC 40, vlhkost adsorboval velmi omezeně, a to jen při její vyšší koncentraci v nosném plynu.



Obr. 1: Aparatura pro testování adsorbentů. 1 – generátor vlhkosti, 2 – adsorbér, 3 – bubnový plynoměr, T-1 – Moisture Monitor Series 35, T-2 – HYGROPHIL Model F 5672, T-3 – Zrcátkový vlhkoměr HYGRO M4

Dále bylo zjištěno, že adsorpční kapacity do určité míry závisí na nosném plynu – obvykle byly adsorpční kapacity v případě CO_2 až o 20 % nižší než v případě dusíku. To lze vysvětlit vyčerpáním části kapacity adsorbentu oxidem uhličitým, který má podobnou velikost molekuly jako voda. Na základě výsledků se jako perspektivní adsorbent pro využití v separační jednotce smyčky sCO_2 jeví molekulové síto 13X. Experimentální program bude pokračovat i v dalších letech, mimo jiné je plánováno i ověření odolnosti adsorbentů v prostředí sCO_2 (12,5 MPa@60 – 100 °C) ve speciální zkušební trati (autoklávu), která je v době psaní tohoto příspěvku ve výstavbě.

Závěr

Ve spolupráci CVŘ a VŠCHT probíhá výzkumný program zaměřený na chemii, čištění a kontrolu čistoty pracovního média sCO_2 energetických okruhů. Na základě dosud dosažených výsledků lze říci, že jednou z nejvýznamnějších nečistot v okruzích s nepřímým ohřevem je vlhkost, která může způsobit korozi i při nízkých objemových zlomcích v plynu. Pro monitorování čistoty se jeví jako vhodná kombinace GC-HID a optického hygrometru. Pro separaci vlhkosti se jako perspektivní jeví adsorbent molekulové síto 13X. Nicméně výzkumné aktivity dále pokračují, v dalších letech se očekávají nové výsledky.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR (TA ČR), projektu „Čištění a kontrola čistoty plynného média CO_2 okruhů“ č. TK02030023.

Literatura

- [1] SCO_2 Power Cycles for Fossil Fuels. *Department of Energy*. [online]. [vid. 2020-04-03]. dostupné z: <https://www.energy.gov/sco2-power-cycles/sco2-power-cycles-fossil-fuels>
- [2] BRUN, Klaus, FRIEDMAN, Peter, DENNIS, Richard. *Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO_2) Based Power Cycles*. 1. vydání, Duxford, United Kingdom: Elsevier, 2017. 465 s. ISBN: 978-0-08-100804-1
- [3] BERKA, Jan, BALLEK, Jakub Vojtěch, VELEBIL, Ladislav, a kol. CO_2 power chemistry in the CV Řež experimental loop, *Acta polytechnica*, 2021, vol. 61, no. 4, p. 1-7, doi: 10.14311/AP.2021.61.0504
- [4] BERKA, Jan, ČERNÝ, Michal, MATĚCHA, Josef. Vysokoteplotní heliová smyčka - nové experimentální zařízení v ÚJV Řež a.s., *Paliva*, 2010, vol. 2, p. 64 – 70, DOI: 10.35933/paliva.2010.02.06
- [5] BERKA, Jan, MATĚCHA, Josef, ČERNÝ a kol. New experimental device for VHTR structural material testing and helium coolant chemistry investigation – High Temperature Helium Loop in NRI Řež. *Nucl. Eng. Des.*, 2012, vol. 251 p. 203–207. DOI:10.1016/j.nucengdes.2011.10.045
- [6] BERKA, Jan, FRÝBORT, Otakar, HLINČÍK, a kol. Energetické okruhy s oxidem uhličitým. *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Srní 29. září – 1. října 2020, s. 247 – 251, ISBN 978-80-261-0959-4

INTEGROVANÝ ODVOD VODÍKU ZE SYSTÉMU KOMPENZACE OBJEMU V TĚLESE HPV

INTEGRATED HYDROGEN DRAINAGE FROM THE VOLUME COMPENSATION SYSTEM IN THE HPV BODY

Martin Pulc

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

V aktivní zóně jaderného reaktoru vzniká především radiolýzou vody vodík, který se přednostně z primárního média odděluje v kompenzátoru objemu. Jedná se ale o nežádoucí plyn, který je především výborným tepelným izolantem a ve spojení se vzduchem tvoří třaskavou směs. Proto je nutné vodík v množství cca 40 kg/hod řízeně odvádět, a to nejlépe oddělováním z primárního média v kompenzátoru objemu. Tato prezentace volně navazuje na on-line Srní prezentaci v roce 2020, kdy byl představen systém odvodu vodíku aplikovaný na JE Temelín a JE Mochovce, který se sestává z externích zařízení a odběrových míst na přívodních potrubí k Hlavním Pojistným ventilům (HPV), Odlehčovacího ventilu (OV) a impulzních ventilech. Při letošní prezentaci bude představen nový systém odvodu vodíku kompletně integrovaný do tělesa HPV a OV systému kompenzace objemu. Tato nová konstrukce vznikla pro nový typ pojistných ventilů Sempell a ve spolupráci firem ŠJS a Sempell. Velkou výhodou integrovaného provedení je jeho kompaktnost, která vylučuje možnost poškození od vnějších vlivů, a to včetně integrovaného uzavíracího ventilu. Toto provedení je nyní firmou Sempell nabízeno pro všechny nové bloky, včetně elektrárny Paks. V tomto příspěvku je popsána historie vývoje tohoto systému v ČR a ve světě, a především je poprvé oficiálně představen tento systém odborné veřejnosti, a to u příležitosti konference v Srní.

Abstract

In the core of a nuclear reactor, hydrogen is mainly produced by radiolysis of water, which is preferably separated from the primary medium in the Pressurizer. However, hydrogen is an undesirable gas, as it is an excellent thermal insulator and is explosive when combined with air. It is, therefore, necessary to remove the hydrogen at a rate of approximately 40 kg/hr in a controlled manner, preferably separating it from the primary medium in a volume compensator. This presentation is loosely related to the online presentation in Srni 2020, when the hydrogen removal system applied at Temelín and Mochovce NPP was presented, consisting of external devices and sampling points on the supply lines to MainSafetyValve (MSV), ReliefValve (RV) and impulse valves. During this year's presentation, a new hydrogen venting system will be presented, completely integrated into the MSV and RV pressurizer system. This new design was developed for a new type of Sempell relief valve in collaboration between SJS and Sempell. The great advantage of the integrated design is compactness, which eliminates the possibility of damage from external influences - and includes the integrated shut-off valve. This design is now offered for all new units, including the Paks plant. This document describes the history of the development of this system in the Czech Republic and in the world – and above all, for the first time, this system is officially introduced to the professional public on the occasion of the conference in Srni.

Úvod

Vodík je výbušný plyn vznikající v primárním okruhu, který musí být cíleně odstraněn z těchto hlavních důvodů:

- při náhlém otevření hlavního pojistného ventilu (HPV) nebo odlehčovacího pojistného ventilu (OV) dojde k velkému úniku nezkondenzovatelných plynů, které způsobí dřívější prasknutí průtržné membrány barbotážní nádrže (BN) a vznikne nebezpečná koncentrace výbušné směsi nejen v barbotážní nádrži ale i v jejím okolí
- vysoký obsah vodíku (vodík působí jako dobrý tepelný izolant) obsažený v parním polštáři kompenzátoru objemu (KO) způsobuje výrazný pokles teploty před pojistnými ventily (HPV, OV) i v části přívodního potrubí, což představuje nebezpečí tepelného rázu (thermal shock) v případě jejich otevření. Tato situace má nepříznivý vliv nejen na jejich životnost a spolehlivost, ale může ovlivnit i změnu jejich otevíracích tlaků. Na tento stav nejsou pojistné ventily kvalifikovány a může dojít i k jejich zaseknutí v otevřené poloze a tím k nekontrolovatelnému úniku primárního média přes prasklé membrány BN do hermetického prostoru
- vysoký obsah vodíku v primárním médiu vede k rozvoji vodíkové koroze nerezových povrchů primárního okruhu

V České a Slovenské republice byla problematika řešení odvodu vodíku řešena již dříve, ale naléhavá celosvětová potřeba doplnění tohoto systému vznikla až po havárii Fukušima Daiichi, kdy k rozsáhlé havárii přispěl také následný požár z uvolněného vodíku.

Hlavní požadavky na systém odvodu vodíku

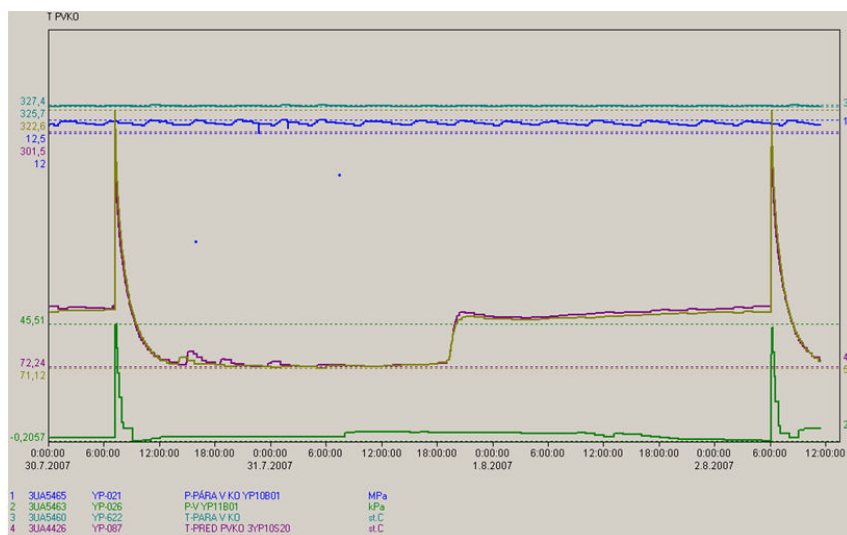
4. trvalé (kontinuální) odvádění s možností uzavření systému při některých režimech bloku (např. nouzový režim v případě výpadku napájení elektroohříváků KO)
5. odstranění vodíku ze všech nejvyšších míst systému kompenzace objemu
6. spolehlivost a dlouhá životnost

Historie vývoje systému odvodu vodíku

To, že nejde o jednoduchou problematiku, dokládá vývoj těchto systémů, který započal před více než 20 lety v Modřanské potrubní a pokračuje přechodem skupiny projektantů potrubářů do Škody JS v roce 2014.

První generace byla založena na jednoduché myšlence odvodu vodíku přes jednoduché by-passy umístěné u každého odběru přes clonku o velikosti cca 0,3 mm, která odpouštěla paroplynnou směs z prostoru před pojistnými ventily potrubí a dále do barbotážní nádrže. Tento systém byl ale velmi náchylný na ucpání clonky, nebo ve velmi krátké době došlo k jejímu poškození (vyšlehání). Dále nebylo možno tento systém za provozu odstavit. Tento systém je dodnes používán na elektrárnách od firmy Framatome a EBO V2.

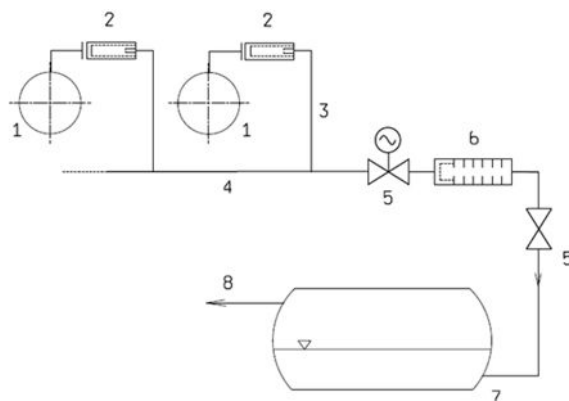
Další evoluční 2. generací byl systém s periodickým odpouštěním (aplikováno dosud na EDU), který odpouštěl jen nezbytně nutné množství paroplynné směsi, ale docházelo pouze k odpouštění již uvolněného vodíku z kolektoru – a velká část vodíku zůstávala neuvolněná v chladivu. Vodík se tedy znovu velmi rychle uvolňoval krátce po jeho odpouštění. Velkým problémem bylo tedy časté a velmi významné střídání teplot (rozdíl až 200 °C) na hlavních pojistných ventilech i ostatních komponentách celého systému.



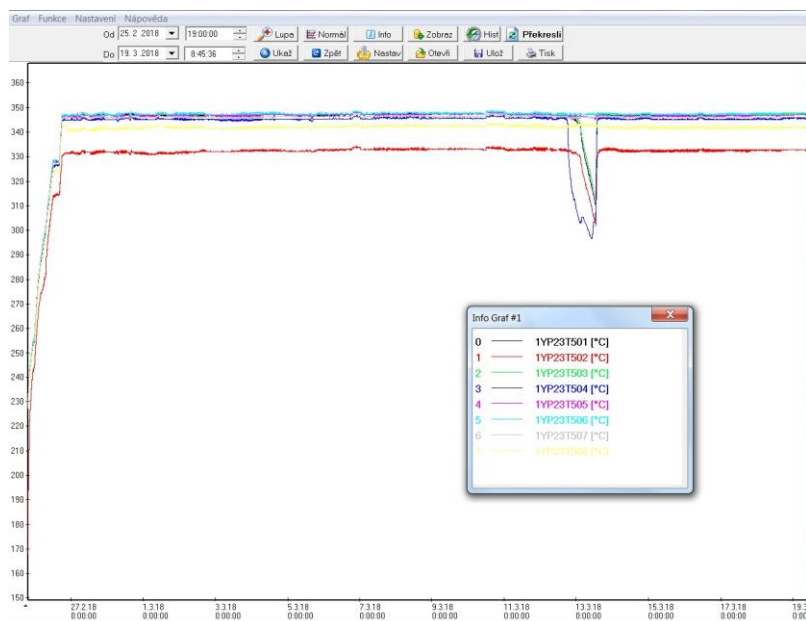
Obr. 1: Graf průběhu teplot při a po odpouštění vodíku na grafu z EDU

Jiné teoretické technické řešení je založeno na podobném principu, jako jsou jednoduché by-passy z každého odběru, ale součástí by-passu není clonka, ale plynový odpouštěč (na principu termostatického ventilu) – podle vynálezu US2013129034 [1]. Tento způsob je ale těžko kvalifikovatelný z důvodu nízké spolehlivosti a nemožnosti systém v případě potřeby na dálku uzavřít. Proto toto řešení nebylo nikde použito.

Třetí generace systému dle uděleného patentu CZ 308421 B6 [2] splnila všechny technické požadavky. Především vedla k rovnoměrnému odvodu vodíku ze systému kompenzace objemu – a tím k stálé teplotě na pojistných ventilech. Dále se vyznačuje robustním uspořádáním centrálního mařiče a možnosti přizpůsobit množství odváděné paroplynné směsi z každého odběru zvlášť. V neposlední řadě je možno v případě potřeby odstavit celý systém (např. při ztrátě napájení vlastní spotřeby).



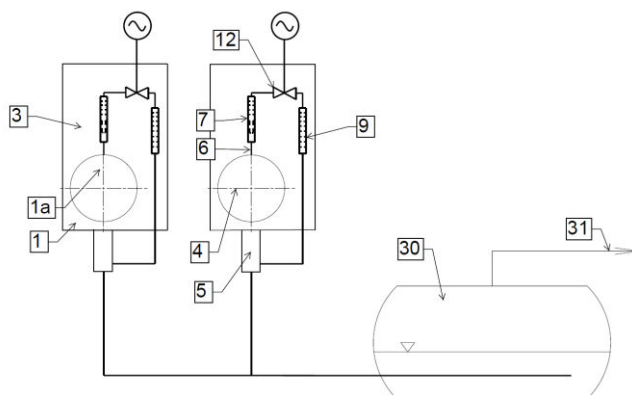
Obr. 2: zjednodušené schéma odvodu vodíku 3. generace



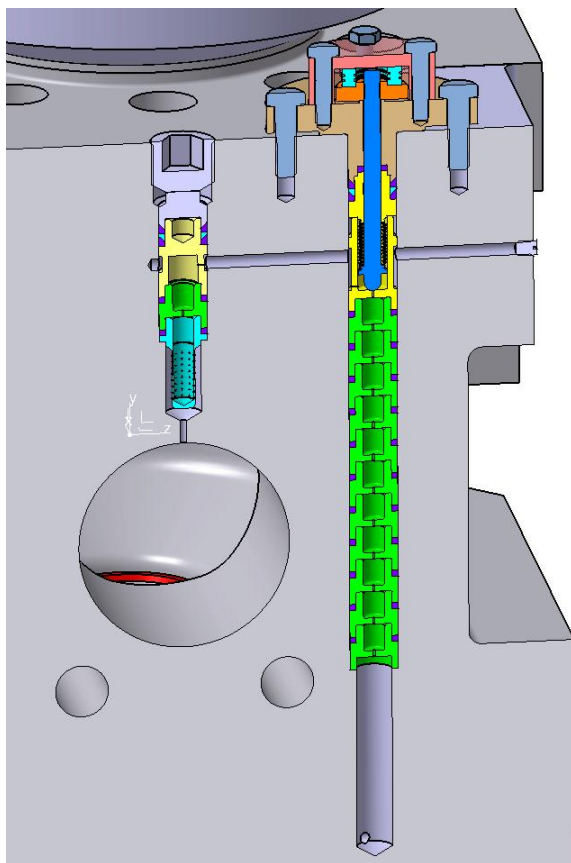
Obr. 3: průběh teplot na odběrech při zkoušce odstavení systému odvodu vodíku na ETE

Nevýhodou tohoto systému ale je, že velké množství odběrových míst je propojeno potrubními trasami malých dimenzí, které jsou v místě složitého uzlu HPV náchylné na poškození. Vhodným dispozičním uspořádáním lze ale nebezpečí poškození do jisté míry eliminovat.

Čtvrtou generaci vyvinula a odzkoušela Škoda JS ve spolupráci s firmou Sempell (dodavatelem HPV a OV na elektrárnách typu VVER a PWR). Systém pak splňuje nejen všechny technické požadavky na odvod vodíku, ale protože je celý systém včetně uzavíracího vlnovcového ventilu integrovaný do tělesa armatury, tak splňuje velmi náročné požadavky na odolnost systému proti vnějšímu poškození. Odběrové místo je tvořeno separační komůrkou v horní části přívodu do tělesa PV doplněnou o vstupní filtr. Z důvodu vyššího počtu škrťacích clon (z důvodu podkritického tlakového spádu) – jsou škrťací clony rozděleny do několika propojených vývrtů. Uzavírací vlnovcový ventil se sekundární ucpávkou je umístěn v horní části tělesa a umožňuje v případě potřeby uzavření systému. Po zpracování tlakového spádu na sestavě přímých a úhlových clonek je paroplynná směs výstupním kanálkem odvedena do výfukového hrdla PV.



Obr. 4: zjednodušené schéma odvodu vodíku 4. generace



Obr. 5: model konstrukčního řešení odvodu vodíku 4. generace

Literatura

- [1] VELAN, K., PAUZER, V. VELAN INC. (2012): *Hydrogen venting device for cooling water of nuclear reactors* WO 2013075229 A1(patent)
- [2] PULC, M., SLACH, J., KOSTKA, P. (2020): *Způsob odvádění paroplynové směsi alespoň jednoho nekondenzovatelného plynu, zejména vodíku, a páry z technologie tlakového systému a zařízení pro provádění tohoto způsobu*, ÚPV, Praha. CZ 308421 B6 (patent)

POSKOKY A TŘEPOTÁNÍ SEGMENTŮ – NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI PROVOZU KLUZNÝCH LOŽISEK S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY SPRAGGING AND PAD FLUTTERING – ABNORMAL CONDITIONS DURING THE OPERATION OF TILT-PAD JOURNAL BEARINGS

Luboš Smolík^{a) b)}, Jan Rendl^{a)}, Štěpán Dyk^{a)}, Radek Bulín^{a)}, Zdeněk Kubín^{b)} a Martin Šifalda^{c)}

^{a)} NTIS – Nové technologie pro informační společnost, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, Technická 8, 301 00 Plzeň

^{b)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

^{c)} Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ, 373 05 Temelín

Abstrakt

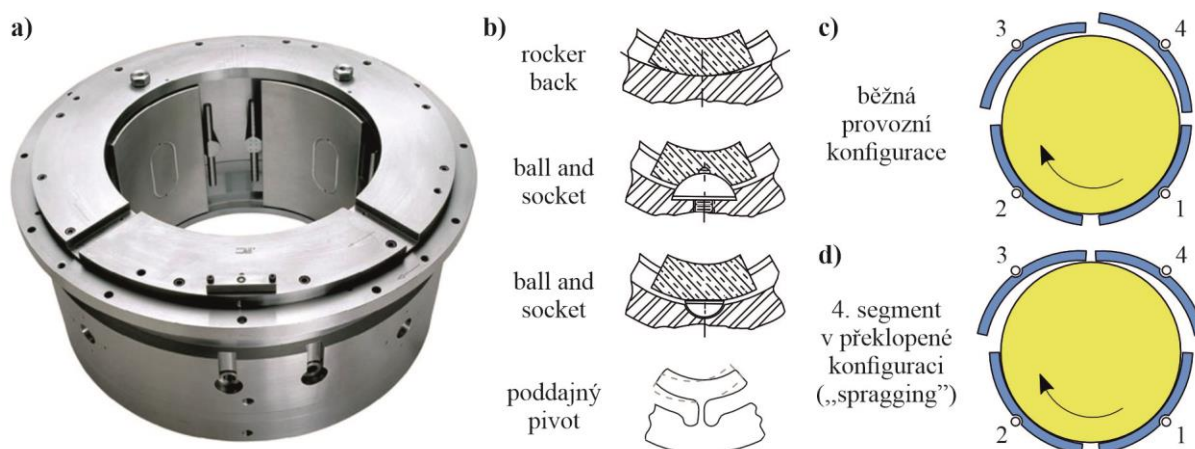
Radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty jsou využívána pro ukládání strojů s vysokou obvodovou rychlostí čepu hřídele. Speciální konstrukce těchto ložisek zabraňuje vzniku nestability olejového filmu, na druhou stranu ale vytváří podmínky pro jevy známé jako poskoky a třepotání segmentů, které mohou poškodit součásti ložiska. Tento článek si klade za cíl rozšířit povědomí o těchto jevech, popsat mechanismus jejich vzniku a způsob diagnostiky.

Abstract

Radial tilt-pad journal bearings are used to support machinery with journals of high circumferential speed. A unique design of these bearings prevents the formation of oil-induced instability. However, the design allows for so-called pad spragging and fluttering, which can damage bearing components. This paper aims to increase awareness of these phenomena, describe the conditions leading to their formation, and present methods to detect them.

Úvod

Radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty, viz Obr. 1a, jsou hojně využívána v aplikacích s vysokými obvodovými rychlostmi. V současné době se tato ložiska používají mj. pro ukládání rotorů turbín a generátorů. Mezi výhody těchto ložisek patří především odolnost proti nestabilitě olejového filmu, malá citlivost na směr zatížení a axiální nevyrovnanost hřídele a také relativně nízká spotřeba oleje [1].



Obr. 1: (a) Radiální kluzné ložisko se čtyřmi naklápěcími segmenty, (b) různé konstrukční provedení opěrných prvků segmentu, (c, d) porovnání běžné a abnormální provozní konfigurace ložiska se čtyřmi naklápěcími segmenty. Obrázek je částečně převzat z [1,2].

Uvedené výhody jsou umožněny speciální konstrukcí ložisek. Činné plochy ložiska (*kompozice*) se nachází na *segmentech*, které se mohou dle potřeby naklápět kolem opěrných bodů (*pivotů*) vůči čepu hřídele i vůči ložiskovému tělesu, viz Obr. 1b. Tato konstrukce však může způsobit i nechtěné chování zejména nezatížených horních segmentů ložiska.

Za provozu jsou segmenty napájeny mazacím olejem, který odděluje kompozici od čepu hřídele. Za nominálního stavu se mezi segmentem a čepem hřídele vytvoří klínová mezera, která se směrem od náběžné hrany segmentu zužuje, jak je ukázáno na Obr. 1c. Dolní segmenty, které jsou zatíženy hmotou rotoru, mají tendenci se natočit tak, aby ložisková mezera měla od náběžné hrany zužující se tvar. Horní segmenty jsou ale zatíženy pouze vlastní vahou, a pokud jsou uloženy kyvně (angl. *rocker back*) nebo na kulových ččkách (angl. *ball and socket*), mohou se volně pohybovat v prostoru ložiskového tělesa [1,3]. Za určitých podmínek, které závisí na kombinaci předtížení a setrvačnosti segmentu, množství mazacího oleje, obvodové rychlosti čepu hřídele a poloze pivotu a jeho konstrukčním provedení [2,3], se náběžná hrana nezatíženého segmentu přiblíží k čepu hřídele a vytvoří rozšiřující se ložiskovou mezeru, viz Obr. 1d. Při takém stavu vymizí tlakový gradient a může dojít i ke ztrátě olejového filmu a ke kontaktu náběžné hrany segmentu s čepem hřídele. S tím jsou spojeny dva typické jevy [2,3]:

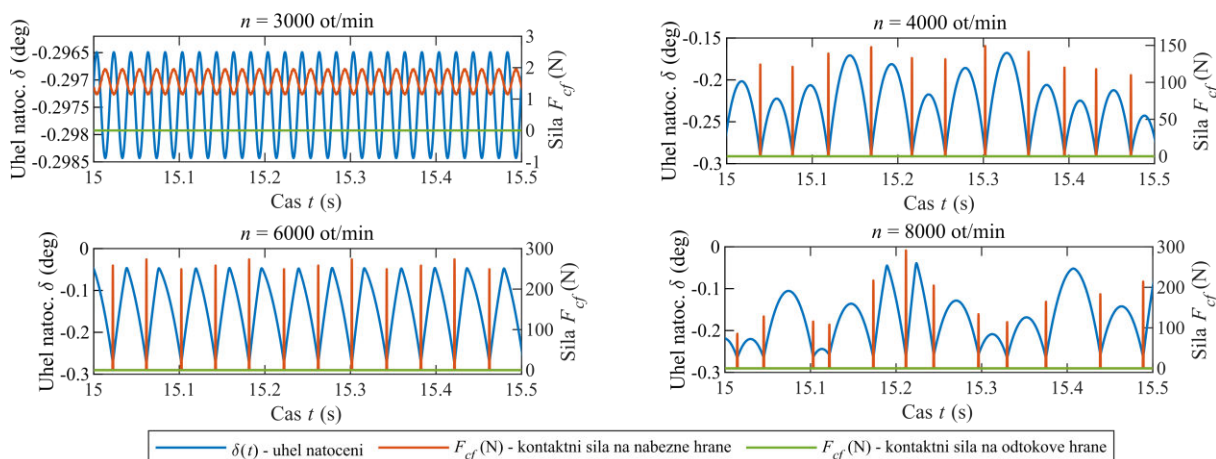
1. poskok (angl. *spragging*) – vlivem ztráty olejového filmu na jedné z činných ploch ložiska se skokově změní poloha segmentu a/nebo čepu hřídele,
2. třepotání segmentu (angl. *fluttering*) – opakovaná ztráta a reformace olejového filmu vede k pulzacím tlakového gradientu a/nebo kontaktům segmentu s ostatními částmi sestavy; segment v takovém případě kmitá na subsynchronní frekvenci odpovídající maximálně polovině otáček čepu hřídele.

Modelování poskoků a třepotání segmentů

Počítačové modelování kluzných ložisek s naklápěcími segmenty je velmi komplexní úloha zahrnující kromě modelování hydrodynamického proudění mezi jednotlivými segmenty a čepem hřídele i dostatečně přesný popis pohybu dílčích segmentů. Pro první přiblížení (velmi často dostatečné) je uvažován pohyb segmentu ložiska jako rovinný bez axiálního naklopení segmentu vzhledem k ose rotace rotoru. Samotný segment má poté jeden stupeň volnosti, tj. rotační okolo pivotu, který je nezbytný pro správné fungování ložiska. Dalším možným zpřesněním je rozšíření o další stupeň volnosti, tj. radiální, který zohledňuje poddajnost pivotu pod zatížením ložiskového uzlu přeneseným přes olejový film na jednotlivé segmenty.

Zatížení jednotlivých segmentů je dáno z velké části předpětím ložiska (angl. *preload*). To může být pro jednotlivé segmenty různé a může pak ovlivňovat chování celého rotorového systému. V případě špatně zvoleného předpětí (zejména u horních segmentů) může dojít k nedostatečnému zformování nosného olejového filmu a vlivem působení tíhové síly a relativního pohybu čepu hřídele dojde k třepotání nebo poskoku segmentu. V krajním případě je nutné uvažovat, že může dojít k vymezení vůlí a správně modelovat kontakt dvou tuhých částí (čep hřídele-segment) např. pomocí Hertzovy teorie kontaktu.

Tlakové pole v olejovém filmu je popsáno Reynoldsovou rovnicí. Na základě rozměrů ložiska a provozních podmínek je nutné uvažovat na základě Reynoldsova čísla, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Vibrace nevyváženého rotoru způsobují fluktuace tlakového pole. Působení tlakového pole na segment se vyjadřuje pomocí hydrodynamické síly, která se získá jeho integrací přes plochu segmentu. Hydrodynamická síla je nelineární vazba mezi čepem hřídele a segmenty, která udržuje tyto dva subsystémy v rovnováze, nebo naopak při nepatrné změně své výslednice uvádí tyto subsystémy do pohybu. Rozložení tlakového pole je ovlivněno nejen relativní polohou čepu hřídele a segmentu, ale také termodynamickými jevy probíhajícími v proudícím mazivu. Ty ovlivňují jeho dynamickou viskozitu, ale také mohou způsobovat kavitaci.



Obr. 2: Časové řady natočení segmentu 4 ložiska o průměru 100 mm (modře) a kontaktní síly na náběžné (červeně) a odtokové hraně (zeleně).

V místě uložení segmentu např. na kulových čočkách je možné zohlednit tření a rozlišovat fáze pohybu segmentu na *ulpívání* a *prokluz* (angl. *stick* a *slip*). To může mít za důsledek omezení naklopení segmentu a tím pádem i ovlivnění správného fungování celého kluzného ložiska, které se v krátkém časovém intervalu může chovat jako ložisko s pevnou geometrií. Mezi nejčastěji používané modely tření patří Bengisu-Akay a LuGre model [4]. Oba modely jsou však velmi závislé na nastavení řídicích parametrů a je nutné věnovat této části modelování velkou pozornost.

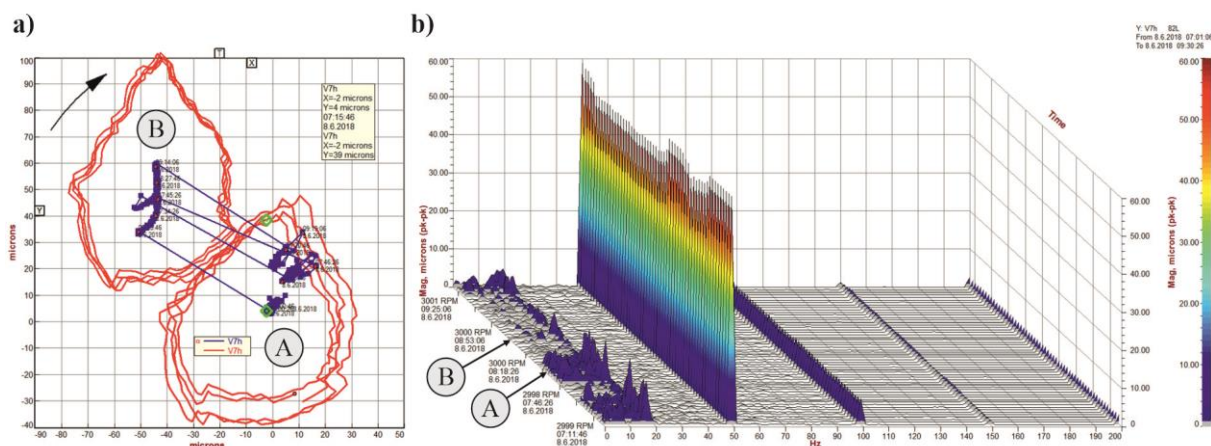
Na Obr. 2 jsou ukázány vybrané časové řady pro simulaci čtyřsegmentového ložiska se zatížením mezi segmenty s parametry převzatými z [5]. Na obrázku jsou vidět průběhy natočení 4. segmentu a vzniklé kontaktní síly na náběžné a odtokové hraně při třepotání horního segmentu. Z výsledků je patrné, že pro 3000 ot/min segment leží na čepu hřídele a pouze díky vibracím hřídele dochází k fluktuaci kontaktní síly. Pro vyšší otáčky pak dochází k úplnému odlehnutí segmentu a následnému rázu, tj. kontaktní síla vymizí a poté se znovu objeví jako impuls síly. Natočení segmentu se vlivem nárazů segmentu a změnou provozních otáček stává nepravidelným a může jevit známky chaotického chování. Na odtokové hraně ke kontaktu segmentu s čepem nedochází, protože se vlivem natočení segmentu vytvoří nosný olejový film, který zabrání dalšímu kontaktu.

Diagnostika poskoků a třepotání segmentů

Projevy poskoků a třepotání segmentů za provozu

Provozní diagnostika poskoků a třepotání segmentů je poměrně obtížná. Na rozdíl od experimentálního výzkumu [6] nejsou za provozu k dispozici snímače měřící pohyb jednotlivých segmentů a diagnostik se musí spolehnout na data ze snímačů relativních rotorových a absolutních ložiskových vibrací [7]. Poskoky jsou pak detekovatelné, pouze pokud při nich dochází ke změně polohy čepu hřídele. Taková změna je ukázána na Obr. 3a, kde je patrný posuv pracovní polohy čepu hřídele mezi body A a B o cca 60 μm .

Pohyb čepu hřídele, ukázaný na Obr. 3a, kolem pracovní polohy A se mírně liší od pohybu kolem pracovní polohy B. Změna je charakterizována přítomností širokopásmových nízkofrekvenčních složek s náhodnou amplitudou, které se vyskytují pouze v pracovní poloze A, viz Obr. 3b [7]. Původ těchto vibrací je v třepotání segmentů ložisek, které se buď olejovým filmem, nebo pomocí elastických kontaktních sil přenesou do čepu hřídele [2]. Lze tedy tvrdit, že v pracovní poloze A pravděpodobně dochází k třepotání jednoho ze segmentů. Bez vizuální kontroly a nalezení příslušných indikací však nelze zjistit, o který segment se jedná.

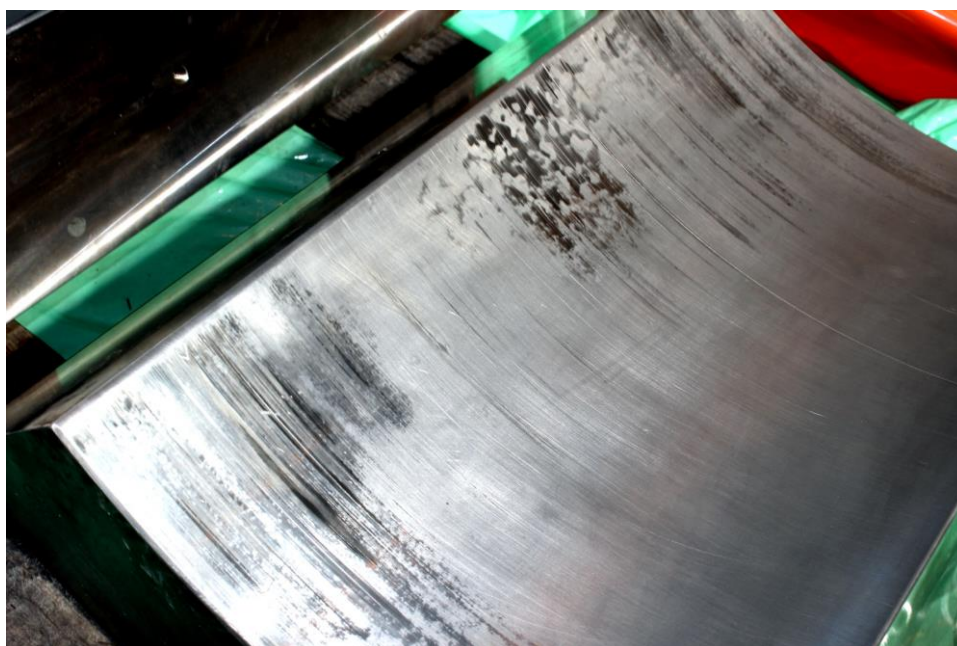


Obr. 3: (a) Záznam změn pracovních poloh čepu hřídele, tzv. poskoků, při ustáleném provozu. (b) Kaskádový diagram dokumentující změny ve frekvenčním spektru vibrací, ke kterým dochází při poskocích mezi pracovními body A a B. Částečně převzato z [7].

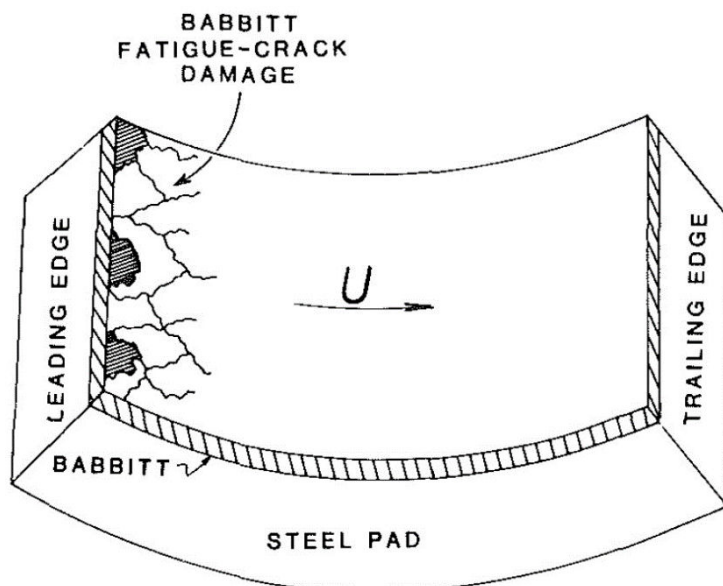
Indikace na kompozici poškozených segmentů

Dlouhodobý provoz s poskoky nebo třepotáním segmentů se projevuje na stavu kompozice postiženého segmentu. Největším problémem je poškození v oblasti kontaktu kompozice s čepem hřídele. V případě čtyřsegmentového radiálního ložiska se zatížením mezi segmenty (Obr. 1c), jde zejména o poškození kompozice 4. segmentu po celé šířce segmentu u náběžné hrany. Tato oblast ukázaná na Obr. 4 již po několika měsících provozu zasahuje asi do 1/3 segmentu ve směru otáčení čepu hřídele. Dlouhodobý provoz s přetrvávajícím třepotáním segmentům vede k inicializaci a postupnému šíření únavových trhlin v oblasti náběžné hrany segmentu, viz Obr. 5. V kritických případech může dojít až k místní ztrátě kompozice [3].

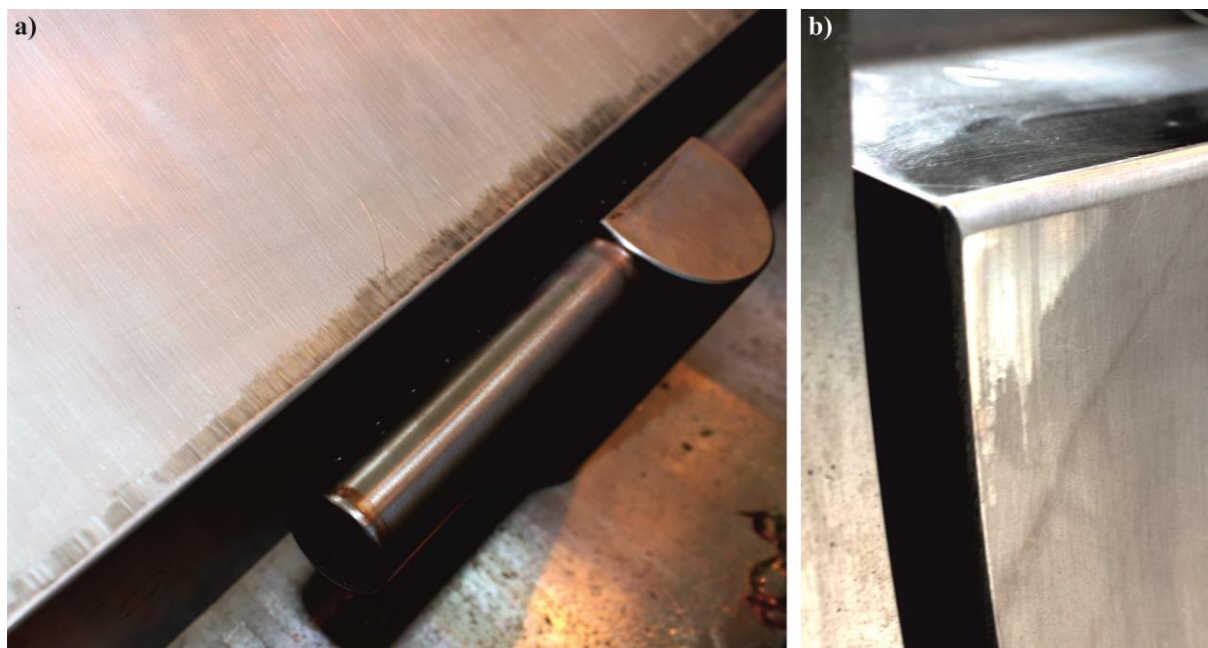
Na 3. segmentech, které jsou také nezatížené, lze nalézt poškození především na výstupní hraně. Zde lze obvykle nalézt stopy kontaktů z Obr. 6a, které se nalézají po celé šířce segmentů, a jsou v obvodovém směru 8 – 10 mm dlouhé. Navíc lze na některých segmentech nalézt velmi jemné stopy otěru na rozích na náběžné hraně, viz Obr. 6b. Je možné, že tyto stopy mohou být spojeny s najížděním, při němž není na činných plochách plně vytvořen nosný olejový film.



Obr. 4: Provoz neohrožující indikace od kontaktu náběžné hrany 4. segmentu s čepem hřídele.



Obr. 5: Rozvoj únavových trhlin v oblasti náběžné hrany segmentu. Obrázek převzat z [3].



Obr. 6: Provoz neohrožující indikace od kontaktu (a) výstupní hrany 3. segmentu a (b) rohu náběžné hrany 3. segmentu s čepem hřídele.

Závěr

Poskoky a třepotání segmentů jsou jevy postihující horní nezatížené segmenty v radiálních kluzných ložiskách s naklápěcími segmenty. Oba jevy jsou spojeny se samovolným náhodným pohybem segmentu, při kterém může docházet ke kontaktům s čepem hřídele nebo jinými součástmi ložiska. Kontaktní síly namáhají součásti a v kritických případech mohou způsobit vznik a rozvoj únavových trhlin především v oblasti náběžné hrany postiženého segmentu.

Vznik poskoku a třepotání segmentů souvisí s konstrukčním návrhem ložiska, zejména s tzv. předtížením horních segmentů a momentem setrvačnosti segmentu. Výskyt jevů je ale silně ovlivněn i provozními parametry jako je množství mazacího oleje, jeho teplota, ale také obvodová rychlost čepu hřídele. Jevy lze s určitými obtížemi detekovat multiparametrickou diagnostikou využívající on-line vibrační data a vizuální kontrolu provedenou za odstávky.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THETA při řešení projektu TK04020057.

Literatura

- [1] DMOCHOWSKI, Waldemar M., DADOUCHE, Azzedine, FILLON, Michel, DeCAMILLO, Scan M. Hydrodynamic Tilting-Pad Journal Bearings. In: *Encyclopedia of Tribology*. New York: Springer, 2013, 1749–1757. ISBN 978-0-387-92897-5.
- [2] RENDL, Jan, DYK, Štěpán, SMOLÍK, Luboš. Nonlinear dynamic analysis of a tilting pad journal bearing subjected to pad fluttering. *Nonlinear Dynamics*, 2021, vol. 105, p. 2133–2156. doi: 10.1007/s11071-021-06748-x
- [3] ADAMS, M. L., PAYANDEH, S. Self-excited vibration of statically unloaded pads in tilting-pad journal bearings, *Journal of Lubrication Technology*. 1983, vol. 105, no. 3, p. 377–383. doi: 10.1115/1.3254616
- [4] MARQUES, Filipe, FLORES, Paulo, CLARO, J. C. Pimenta, LANKARANI, Hamid M. A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 86, no. 3, p. 1407–1433. doi: 10.1007/s11071-016-2999-3
- [5] HAUGAARD, Asger M., SANTOS, Ilmar F. Stability of multi orifice active tilting-pad journal bearings. *Tribology International*. 2010, vol. 43, no. 9, p. 1742–1750. doi: 10.1016/j.triboint.2010.04.013
- [6] IKEDA, Kazunori, HIRANO, Toshio, YAMASHITA, Tatsuo, MIKAMI, Makoto, SAKAKIDA, Hitoshi. An experimental study of static and dynamic characteristics of a 580mm (22.8in.) diameter direct lubrication tilting pad journal bearing. *Journal of Tribology*, 2005, vol. 128, no. 1, p. 146–154. doi: 10.1115/1.2114929
- [7] HYRÁT, Jan. *Vliv změny polohy čepů ložisek L3 a L4 („poskoky“) na životnost a spolehlivost TG2 1000 MW ETE*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav, 2018. Technická zpráva, VYZ-TNZ-56/18/018.

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. (CVŘ)

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.

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].

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 obrázek 1.

Tab. 1: Parametry a výsledky nízko-cyklických zkoušek.

Označení	Tloušťka CS+Sub (mm)	Šířka (mm)	Délka (mm)	CS (mm)	L (mm)	σ (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), σ 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

Teplotní únava

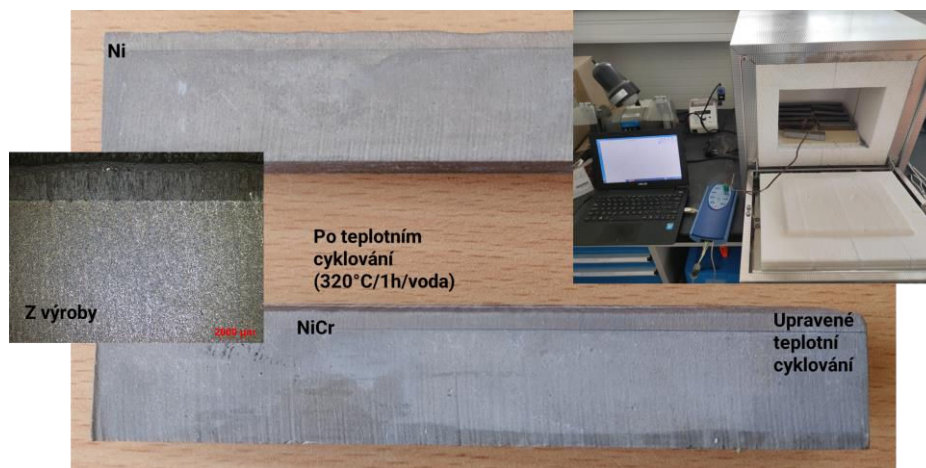
Teplotní cyklování bylo realizováno ohřátím zkušebních těles na teplotu 320 °C s následným ochlazením do vody, celkem pro 30 cyklů. Zkoušky na ověření stavu povlaku po vystavení teplotní únavě byly stejné jako v předchozím případě, tj. ultrazvukové zkoušení, optické hodnocení a metalografická analýza. 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 odloupenutí 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 měřením 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. Náhrev trendem 10 °C/hod na 170 °C s 1hodinovou výdrží na teplotě pro ustálení.
2. Náhrev na teplotu 270 °C větším trendem pro dosažení cílové teploty do cca 30 min.
3. Vychladnutím 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 obrázek 2.



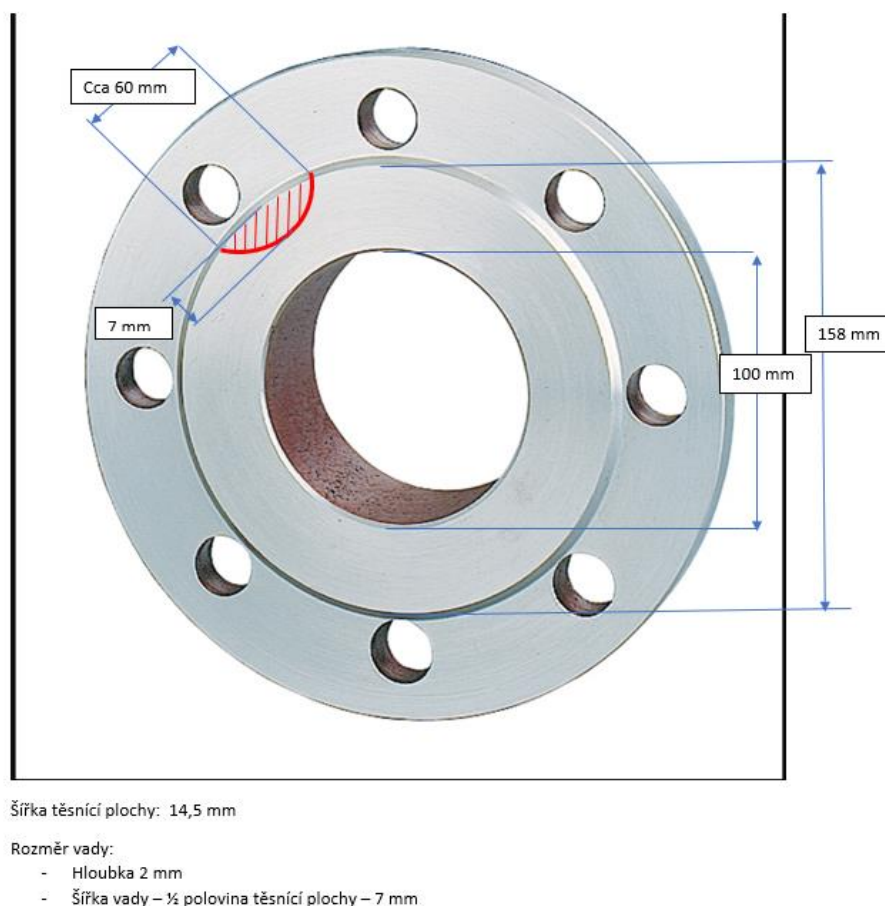
Obr. 2: Stav zkušebních těles s CS povlakem z prášku Ni a NiCr po realizování teplotní únavy

Výsledky metalografické analýzy zkušebních těles po teplotních únavových zkouškách nebyly v době psaní článku dostupné, jejich vyhodnocení proběhne do konce roku 2022.

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 obrázek 3.
3. Ověření stavu rozhraní substrát – CS povlak pomocí ultrazvukového zkoušení a metalografické analýzy příruby po těsnostní zkoušce.



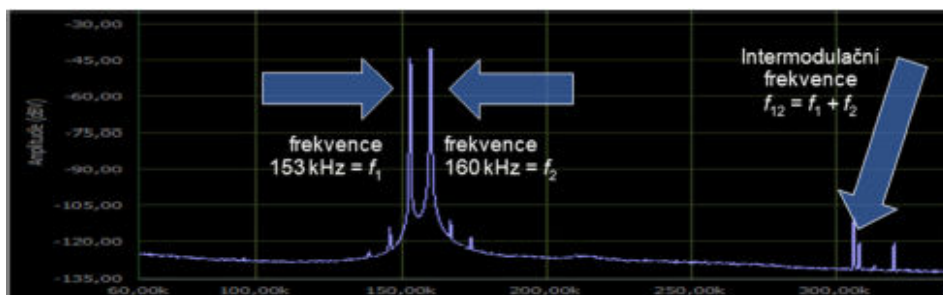
Obr. 3 – Rozměry imitované vady slepé příruby, která bude opravena technologií Cold Spray

V době psaní článku byla příruba připravena ke zhotovení CS povlaku. Výsledky všech zkoušek budou k dispozici ke konci roku 2022.

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 je monitorování vybraných tras primárního okruhu s cílem detekce trhlin, které se nachází mezi budiči a přijímači ultrazvukových signálů.

Principem metody NEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) je směšování dvou různých budících signálů o frekvencích f_1 a f_2 uvnitř zkoušeného materiálu pomocí snímačů typu budič a sledování odezvy v 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.



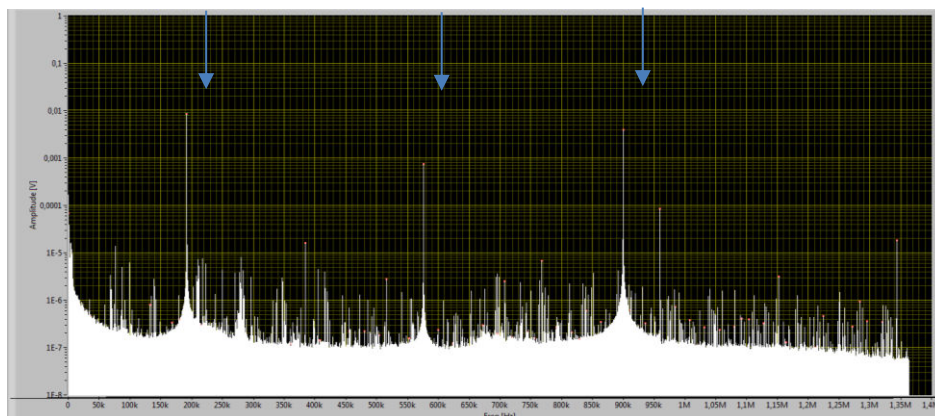
Obr. 4 – Princip metody NEWS

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.

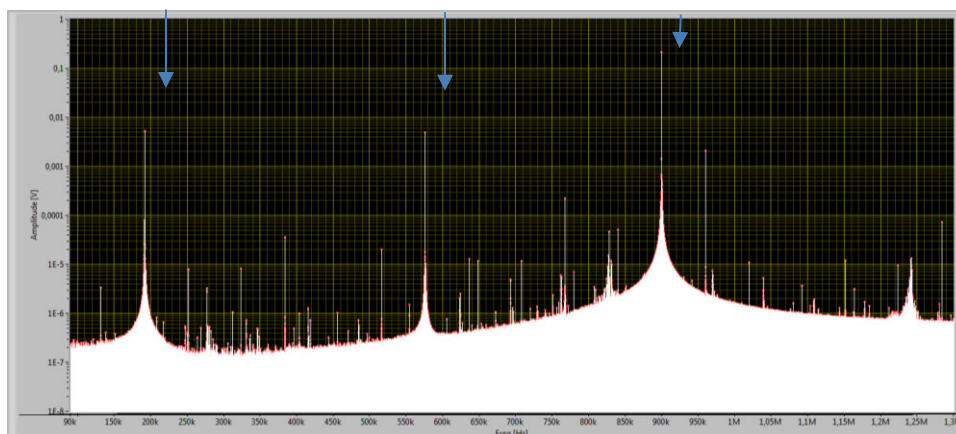
Vývoj a ověření metodiky v roce 2022 probíhá podle následujícího programu – viz [6]:

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 vč. 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 psaní 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 obrázky 5 a 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)

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 spojení, 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, 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, rev. 1
- [2] PARSI Arash, LAREAU Jack, GABRIEL Brian, CHAMPAGNE Victor. Cold Spray Coatings for Prevention and Mitigation of Stress Corrosion Cracking; *Cold Spray Action Team 2012*
- [3] CAVALIERE P, SILVELLO A, CINCA N, CANALES H, Dosta S, Garcia Cano I, Guilemany J M. Microstructural and fatigue behavior of cold sprayed Ni-based superalloys coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 324, pp 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, 309, pp 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. *J Therm Spray Tech* (2018) **27**:159–168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0665-z>
- [6] BROM Jaroslav, 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*, Centrum výzkumu Řež s.r.o., únor 2022, Technická zpráva, PL4340, rev. 0

MOŽNOSTI REVERZNÉHO INŽINIERINGU A ADITÍVNEJ VÝROBY PRI NÁROČNÝCH A ČASOVO LIMITOVANÝCH OPRAVÁCH V PRIEMYSLE

POSSIBILITIES OF REVERSE ENGINEERING AND ADDITIVE MANUFACTURING IN DEMANDING AND TIME-LIMITED REPAIRS IN INDUSTRY

Peter Brziak, Miroslav Jáňa, Vojtech Václav, Rastislav Dankovič a Jiří Svoboda

Výskumný ústav zvaračský z.z.p.o., Bratislava

Anotácia

Techniky reverzného inžinieringu zahŕňajú analýzu existujúceho dielu, ako aj zhodnotenie dostupných informácií o jeho konštrukcii a funkcii, aby sa umožnila jeho výroba respektíve oprava. Reverzný inžiniering sa zvyčajne používa v situáciách, keď nie sú k dispozícii úplné informácie o pôvodnom dizajne, dodávatelia už neexistujú alebo je dodacia lehota náhradného dielu neprijateľná. Článok popisuje niektoré dôležité faktory úspešnej aplikácie reverzného inžinieringu. Zároveň uvádza príklad úspešnej realizácie reverzného inžinieringu a aditívnej výroby v procese náročnej opravy poškodeného hriadeľa.

Kľúčové slová: reverzný inžiniering, aditívna výroba

Abstract

Reverse engineering techniques involve examining an existing specimen as well as review and analysis of information available about the item's design and its design functions to enable manufacturing or otherwise facilitate acquisition of the item. Reverse-engineering techniques are typically applied in situations where complete original design information is not available, the suppliers ceased, or the delivery time of spare part is unacceptable. The article describes some important factors of successful application of reverse engineering. It gives an example of the successful implementation of reverse engineering and additive production in the process of demanding repair of a damaged shaft.

Key wards: revesre engineering, additive manufacturing

Úvod

Keďže dodávatelia zariadení a náhradných dielov neustále odchádzajú z trhu, alebo majú (špeciálne v súčasnom období) neakceptovateľné dodacie doby, výrobné firmy musia využívať nové prístupy, aby zabezpečili obstarávanie náhradných dielov respektíve ich kvalifikovanú a efektívnu opravu/údržbu. Preto je nevyhnutné zavádzať inovatívne techniky na analýzu, návrh a vyhotovenie náhradných dielov pre existujúce zariadenia, alebo na modifikáciu zariadení respektíve inštalovanie nových alternatívnych náhradných zariadení. Reverzný inžiniering je účinným nástrojom na dosahovanie týchto cieľov. Ak je vhodne aplikovaný, môžu firmy, ktoré ho poskytujú, prevziať plnú zodpovednosť za kvalitu vyrobeného/opraveného dielu. Kolaterálny efekt je, že výrobné firmy môžu využívať svoje zariadenia oveľa efektívnejšie, znížiť náklady na opravy a údržbu a zavedením nových obchodných väzieb zvýšiť dostupnosť dielov. Najuniverzálnejšia definícia opisuje reverzný inžiniering ako:

„Proces duplikácie dielu fyzickým preskúmaním a zhodnotením dostupných informácií (funkčných, fyzikálnych a materiálových charakteristík) nevyhnutných pre jeho výrobu.“

Reverzný inžiniering siaha do počiatkov priemyselnej revolúcie. Výraznejšie sa rozšíril až v poslednej dobe. Prvým iniciátorom celoplošného a systematického programu reverzného inžinieringu zameraného na priemysel bola vláda USA v 80. rokoch minulého storočia. Bol to

dôsledok cien náhradných dielov a komponentov účtovaných dodávateľmi pre obranný priemysel. Jeho výsledkom bolo vypracovanie legislatívneho rámca na ochranu zákazníka a rozšírenie konkurencie dodávateľov. Po vyriešení legislatívnych problémov a zavedení normalizovanej metodológie pre reverzný inžiniering rozbehla armáda USA viaceré projekty, ktoré priniesli úspory cca. 400 mil. USD už počas prvých troch rokov existencie metodológie.

Primárnym cieľom príspevku je poskytnúť úvahy ako a kedy použiť reverzný inžiniering na dielce a komponenty výrobných zariadení. Sekundárnym cieľom je poskytnúť určitý pohľad ako analyzovať náklady a pristupovať k rizikám reverzného inžinieringu.

Aktuálna situácia na trhu s dodávkou/opravou/údržbou náhradných dielov

Počas fázy výstavby boli výrobné zariadenia a ich časti navrhované s použitím klasických inžinierskych metód. Konštrukčné návrhy boli prevzaté z iných priemyselných zariadení a tieto boli upravované pre potreby príslušných aplikácií tak, aby vyhovel špecifickým licenčným požiadavkám podnikov, vhodnosti pre daný účel a existujúcim regulačným predpisom. Obvykle bol konštrukčným návrhom poverený výrobca originálneho zariadenia. Toto je dôvod, prečo sa väčšina výrobnej dokumentácie nachádza mimo výrobných firiem. Niektorí dodávatelia považovali svoje konštrukčné riešenia za svoje súkromné vlastníctvo a tým pádom umožňovali podnikom alebo tretím stranám len obmedzený prístup k projektovej dokumentácii. Pokles dopytu pro výrobe výrobných celkov, spolu so snahami o alternatívne inžinierske riešenia a technickým pokrokom v konštrukčnom riešení spôsobili, že mnohí výrobcovia originálnych zariadení prestali primerane podporovať svoje dlhodobu prevádzkované výrobné jednotky, respektíve si pýtajú za náhradné diely vysoké sumy a ponúkajú neakceptovateľné dodacie doby. Najhorší stav je v jadrovej energetike kde cca. 50–70 % tradičných jadrových dodávateľov opustila tento segment alebo ho v najbližších rokoch plánuje opustiť.

Keďže podniky a zariadenia navrhnuté pred viac ako 30 rokmi neustále starnú, tento problém sa ešte viac vyhrocuje. Dodávatelia budú aj naďalej opúšťať trh spolu s väčšinou historickej technickej dokumentácie. Bude čoraz ťažšie alebo dokonca nemožné dostať sa k nejakým informáciám o návrhu jednotlivých konštrukčných uzlov. Ďalším problémom je zmena vlastníckych pomerov, odchod kľúčových ľudí do dôchodku, respektíve reštrukturalizácia firmy na iné ekonomicky perspektívnejšie odvetvia, čím udržiavanie zastaranej konštrukčnej dokumentácie stráca význam pre mnohé dodávateľské firmy. Tento problém ešte zhoršuje akútna potreba výrobných firiem výrazne znížiť náklady na prevádzku a údržbu tak, aby boli konkurencieschopné a zároveň dodržiavali požiadavky národnej legislatívy, ako i svoje vlastné interné predpisy.

Nedostatok tradičných dodávateľov bude teda podniky nútiť, aby pristúpili k modifikácii technickej úrovne komponentov tak, aby využívali techniky reverzného inžinieringu na analýzu, návrh a výrobu náhradných dielov pre existujúce zariadenia. Podniky budú musieť vytvárať nové obchodné vzťahy, aby dokázali k svojmu prospechu využiť pozitívne aspekty reverzného inžinieringu, výroby a modifikácie potrebných prvkov. Reverzný inžiniering je účinným nástrojom na dosiahnutie týchto cieľov. Dáta získané pomocou reverzného inžinieringu možno použiť aj na podporu obstarávania, alebo vstupnej kontroly/preberania výrobku. Reverzný inžiniering môže byť tiež použitý ako účinný nástroj pri analýze koreňovej príčiny porušenia a aktualizácii položiek.

Ekonomické faktory reverzného inžinieringu – rozhodovací proces

Hlavným cieľom úspešného projektu reverzného inžinieringu je vytvoriť súbor informácií, ktorý bude postačujúci na výrobu nového dielu, čoho výsledkom môže byť vlastníctvo technickej dokumentácie a fakt, že riadenie procesu navrhovania (konštrukcie) môže byť prenesené na príslušný podnik.

Prax ukazuje, že dodávateľia odmietajú poskytovať technickú dokumentáciu alebo iné údaje svojím zákazníkom. Avšak akonáhle podniky začali využívať reverzný inžiniering na vybrané komponenty, niektorí dodávateľia začali poskytovať technickú dokumentáciu za minimálny poplatok. Uvedomujúc si skutočnosť, že podniky sú úspešné pri reverznom inžinieringu rôznych položiek, niektorí dodávateľia ponúkajú dodanie tej istej položky za podstatne nižšiu cenu ako to bolo pri predošlom obstarávaní. Dodávateľia taktiež predávajú komponenty, ktoré získavajú subdodávateľsky od výrobcov nižšej úrovne (t. j. s nižšími cenami). Takže položka je dodaná podniku prostredníctvom dodávateľov, ale v skutočnosti bola vyrobená treťou stranou. Jedným z účelov reverzného inžinieringu je preto podstatné zníženie nákladov vytvorením konkurenčnej ponuky a eliminovaním nákladného obstarávania z jedného zdroja. Tab. 1 popisuje dve základné možnosti ako môže dodávateľ vyrobiť náhradný diel. V obidvoch prípadoch na konci zákazky vlastní zákazník výkresovú dokumentáciu.

Tab. 1 Scenáre dodávky výrobku vyrobeného pomocou reverzného inžinieringu.

Konštrukčné detaily	Scenár	Zodpovednosť zákazníka	Zodpovednosť dodávateľa
Konštrukčné detaily dielu sú známe	- Zákazník poskytuje kompletný dizajn - Diel vyrobený podľa priemyselných štandardov	- Zákazník poskytuje kompletný dizajn - Zákazník vlastní výrobné výkresy dizajnu, je zodpovedný za všetky očakávané parametre dielu vrátane modifikácií	- Dodávateľ nerobí konštrukčnú prácu - Dodávateľ vyrába podľa dodanej výkresovej dokumentácie - Dodávateľ osvedčuje výkresovú dokumentáciu
Konštrukčné detaily dielu nie sú známe	- Zákazník poskytuje poškodený/ nepoškodený diel - Zákazník poskytuje technické/ prevádzkové nároky na diel/zariadenie	- Zákazník si overuje, či je dodávateľ schopný poskytnúť plnohodnotný reverzný inžiniering - V objednávke sa definuje zodpovednosť za konštrukčné riešenie - Zákazník potvrdí dodávateľom navrhnuté konštrukčné riešenie - Zákazník bude vlastniť detaily konštrukčného riešenia - Zákazník poskytuje informácie potrebné na osadenie dielu do zariadenia	- Dodávateľ musí získať konštrukčné informácie - Dodávateľ osvedčuje vhodnosť dodávaného dielu pre zákazníkom požadovaný účel - Dodávateľ poskytuje výrobnú dokumentáciu zákazníkovi na schválenie

Podniky môžu dosiahnuť značné úspory nákladov reverzným inžinieringom dielu ako aj jeho obstaraním priamo od originálneho výrobcu nižšej úrovne s nižšou cenou. Kľúčom k tejto metóde je ale stanovenie, kto je vlastne výrobcom nižšej úrovne. To môže byť často ťažkou úlohou. Riešením môže byť dôkladná technická analýza náhradného alebo prevádzkovaného dielu a sledovanie akýchkoľvek znakov alebo iných informácií, ktoré odhalia výrobcu nižšej úrovne.

Analýza rizika

Reverzný inžiniering má vlastné špecifické riziká. Veľakrát sa môžu vynaložiť značné zdroje len preto, aby sa zistilo, že nie je možné získať dostatok informácií na aplikáciu reverzného inžinieringu danej položky. Riziko úspešnosti projektu je preto priamo úmerné zložitosti dielu, ktorý má byť vyrobený pomocou reverzného inžinieringu. Ten sa musí zavádzať veľmi starostlivo s realistickým zvážením dostupných zdrojov a pravdepodobnosti úspechu. Ak je dostatok času a pridelených zdrojov, v princípe je možné každý diel vyrobiť reverzným inžinieringom. Nie vždy je to ale najvýhodnejšie riešenie. V princípe platí, že náklady na reverzný inžiniering extrémne zložitých dielov sa nemusia vrátiť, respektíve výsledok nemusí byť zodpovedajúci vynaloženej námahe. Špeciálne výrobné podniky veľakrát nedisponujú prístrojovým vybavením a odborným personálom na realizáciu reverzného inžinieringu.

Analýza nákladov a prínosov

Analýza nákladov a prínosov pre klasické projekty reverzného inžinieringu v priemysle je málokedy jednoznačná, nakoľko sú informácie skreslené viacerými faktami. Ak však existuje možnosť, že včasné nedodanie dielu alebo komponentu môže spôsobiť výpadok výroby závodu už len na jeden deň, potom je akýkoľvek projekt reverzného inžinieringu opodstatnený. Je ale potrebné zmeniť prístup vyhodnotenia obstarávacej ceny náhradného dielu. Namiesto vyhodnocovania každého obstarávania iba na základe aktuálnej ceny, je potrebné zvážiť úsporu nákladov, ktoré sa môžu dosiahnuť prostredníctvom reverzného inžinieringu a analýzy nákladov na životný cyklus zariadení a ich komponentov.

Problémy, ktoré je potrebné riešiť z hľadiska nákladov na životný cyklus samotného výrobku sú:

1. Frekvencia potreby výmeny dielu.
2. Požadovaná údržba dielu.
3. Priemerný čas medzi opravami.
4. Priemerný čas medzi poruchami.
5. Spoľahlivosť dielu.
6. Celková kvalita dielu.

Na overenie, či sa oplatí firme investovať do reverzného inžinieringu, sa dá použiť veľmi jednoduchý vzorec:

$$NRE = \frac{(LCS - REC)}{REC}$$

kde

NRE = Návratnosť po aplikácii reverzného inžinieringu.

LCS = Rozdiel medzi nákladmi na diel dodaný/vyrobený tradičným spôsobom a nákladmi za diel vyrobený pomocou reverzného inžinieringu. V týchto nákladoch sa musia odzrkadliť benefity reverzného inžinieringu počas celého životného cyklu dielu, ako i samotnej výrobnéj technológie. V prípade, že ide o diel, ktorý sa počas životného cyklu výrobnéj technológie viackrát vymieňa, tento rozdiel sa násobí príslušným počtom výmen.

REC = Náklady spojené s reverzným inžinieringom daného dielu.

Príklad: náhradný diel stojí na trhu 20 000 € a počas životného cyklu technológie je potrebné ho 10krát vymeniť. Cena dielu je po aplikovaní reverzného inžinieringu 15 000 €. Cena za tvorbu technickej dokumentácie pomocou reverzného inžinieringu je 20 000 €, potom

$$NRE = \frac{((20\,000 - 15\,000) \times 10 - 20\,000)}{20\,000}$$

$$NRE = 1,5$$

V princípe sa reverzný inžiniering oplatí pre akékoľvek NRE väčšie ako 1. V praxi sa ale firmy intenzívne zaujímajú o reverzný inžiniering pri hodnotách NRE nad 2,5. Samotný rozhodovací proces je samozrejme oveľa zložitejší. Tab. 2 uvádza názorný príklad odhadu použiteľnosti reverzného inžinieringu. Hodnoty NRE sú vypočítané na základe nasledovných údajov:

1. cena za aplikáciu reverzného inžinieringu bola stanovená ako 50 % ceny dielu.
2. Diel sa počas životného cyklu výrobnéj jednotky vymieňa 20krát.
3. Rozsah ceny za diel vyrobený reverzným inžinieringom sa pohybuje od 100 % do 50 % z ceny dielu, ktorý je dodaný štandardne.

Z Tab. 2 vyplýva, že reverzný inžiniering sa v princípe neoplatí aplikovať, ak cena takto vyrobených dielov je na úrovni cca. 85 % ceny štandardne dodaného dielu. V prípade ceny pod 70 % z ceny štandardne dodaného dielu, je návratnosť investície do reverzného inžinieringu už po výmene 5 dielov.

Jednou z najväčších položiek pri odhade ceny dielu, ktorý je vyrobený reverzným inžinieringom, sú tolerancie a povrchová drsnosť. Ide o parametre, ktoré môžu, ak sú zle definované:

1. Spôsobiť nefunkčnosť dielu (podhodnotené tolerancie a zle definovaná drsnosť).
2. Zásadne zvýšiť výrobnú cenu (zbytočne presné tolerancie, zle definovaná úroveň povrchových úprav). Zvýšenie výrobných tolerancií o rád môže zvýšiť cenu výroby 20násobne. Výpočet NRE potom ukáže nekorektné hodnoty.

Tab. 2 Príklad odhadu vhodnosti aplikácie reverzného inžinieringu

Počet dielov za životný cyklus	Cena dielu vyrobeného spätným inžinieringom (% z ceny dielu a dodaného štandardným spôsobom)										
	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
1	-0,50	-0,45	-0,40	-0,35	-0,30	-0,25	-0,20	-0,15	-0,10	-0,05	0,00
2	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
3	-0,50	-0,35	-0,20	-0,05	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	1,00
4	-0,50	-0,30	-0,10	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10	1,30	1,50
5	-0,50	-0,25	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
6	-0,50	-0,20	0,10	0,40	0,70	1,00	1,30	1,60	1,90	2,20	2,50
7	-0,50	-0,15	0,20	0,55	0,90	1,25	1,60	1,95	2,30	2,65	3,00
8	-0,50	-0,10	0,30	0,70	1,10	1,50	1,90	2,30	2,70	3,10	3,50
9	-0,50	-0,05	0,40	0,85	1,30	1,75	2,20	2,65	3,10	3,55	4,00
10	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
11	-0,50	0,05	0,60	1,15	1,70	2,25	2,80	3,35	3,90	4,45	5,00
12	-0,50	0,10	0,70	1,30	1,90	2,50	3,10	3,70	4,30	4,90	5,50
13	-0,50	0,15	0,80	1,45	2,10	2,75	3,40	4,05	4,70	5,35	6,00
14	-0,50	0,20	0,90	1,60	2,30	3,00	3,70	4,40	5,10	5,80	6,50
15	-0,50	0,25	1,00	1,75	2,50	3,25	4,00	4,75	5,50	6,25	7,00
16	-0,50	0,30	1,10	1,90	2,70	3,50	4,30	5,10	5,90	6,70	7,50
17	-0,50	0,35	1,20	2,05	2,90	3,75	4,60	5,45	6,30	7,15	8,00
18	-0,50	0,40	1,30	2,20	3,10	4,00	4,90	5,80	6,70	7,60	8,50
19	-0,50	0,45	1,40	2,35	3,30	4,25	5,20	6,15	7,10	8,05	9,00
20	-0,50	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50

Aplikácia reverzného inžinieringu

Aby bol proces reverzného inžinieringu účinný, mal by byť integrovaný v celom podniku. Jeden z kľúčov k úspešnému programu reverzného inžinieringu je identifikácia vhodných kandidátov. Voľba kritérií pre každý jednotlivý podnik bude odlišná a bude závisieť na individuálnom vyhodnotení. Avšak, na základe spätnej väzby z priemyslu najbežnejšie využitie reverzného inžinieringu vychádza z:

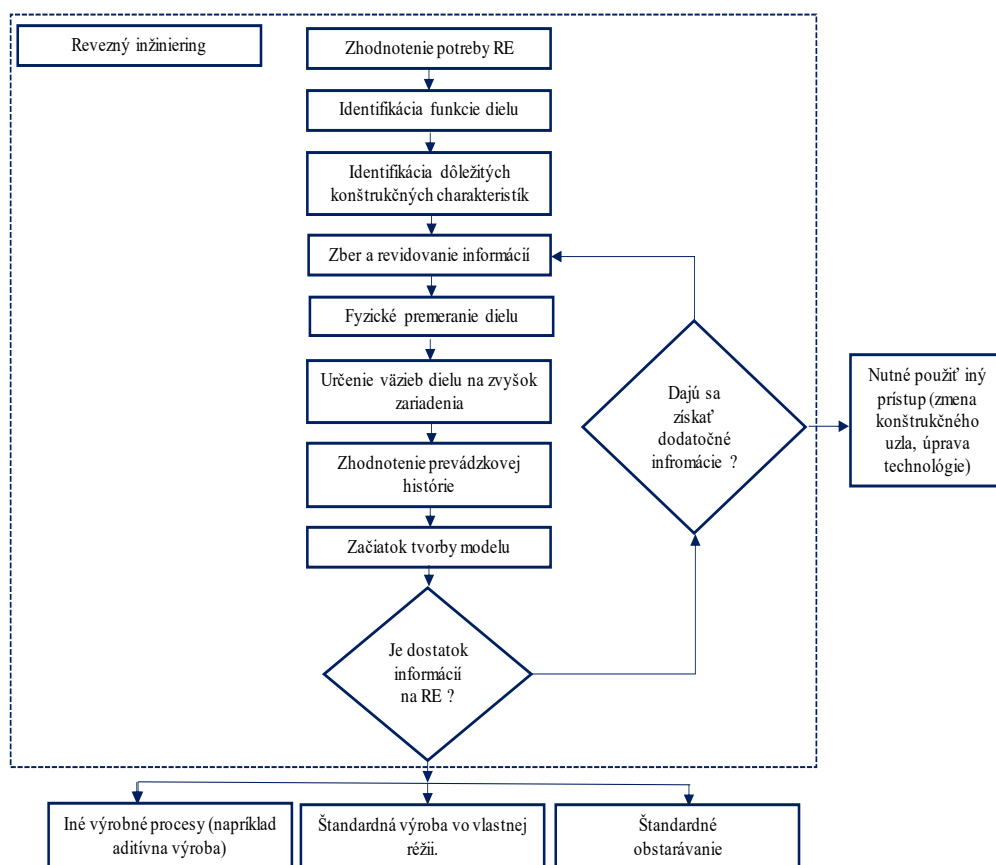
- úrovne morálneho a fyzického opotrebenia dielov,
- počtu dielov, pri ktorých výrobca nedisponuje primeraným programom zabezpečenia kvality,
- úrovne technickej podpory výrobcov náhradných dielov,
- rastu ceny náhradných dielov,
- dodacej doby.

Požiadavky na reverzný inžiniering môžu byť iniciované personálom údržby, systémovými inžiniermi, personálom vstupnej kontroly, nákupcami alebo inými pracovníkmi podniku, ktorí sa zaoberajú prevádzkou a údržbou.

Proces reverzného inžinieringu vyžaduje multidisciplinárny prierezový tím. Keďže tento proces vyžaduje analytické vyhodnotenie údajov a inžinierske posúdenie daného komponentu, je logické, aby primárne zodpovedná skupina mala dostatočnú úroveň odbornosti v strojárnských disciplínach.

Pred rozhodnutím aplikovať reverzný inžiniering sa odporúča, aby podnik zvážil všetky ostatné opatrenia a metódy, ako je alternatívna náhrada alebo technické úpravy. Reverzný inžiniering nesie riziká a neexistuje garancia úspechu, a to ani pri značných výdajoch. Riziko sa taktiež exponenciálne zvyšuje so zložitosťou danej položky. Riziká sú vyššie, ide o komponent bezprostredne súvisiaci s bezpečnosťou prevádzky, alebo o komponent, ktorý je súčasťou tlakového celku. Podnik môže využívať techniky reverzného inžinieringu v rôznych štádiách prevádzky a údržby výrobných zariadení. **Komponenty môžu byť ošetrované reverzným inžinieringom aj v prípade, ak sa požaduje zlepšenie procesu vstupnej kontroly**, respektíve podnik má pochybnosť o adekvátnosti ponúknutého technického riešenia dodaného dielu. Pred prístupom k samotnému výkonu reverzného inžinieringu by mal podnik vykonať audit jeho vhodnosti z technického hľadiska. Zároveň musí byť preukázané, že reverzný inžiniering je ekonomickejšou alternatívou k iným prístupom, ako je napríklad oprava.

Obr. 1 popisuje všeobecný proces reverzného inžinieringu (definovanie kritických charakteristík, zber a vyhodnocovanie údajov atď.), ktorý možno vykonávať aj v inom poradí ako je zobrazené na vývojovom diagrame. Niektoré kroky môžu byť vynechané na báze posúdenia od prípadu k prípadu, pokiaľ sú pre daný prípad nepoužiteľné.

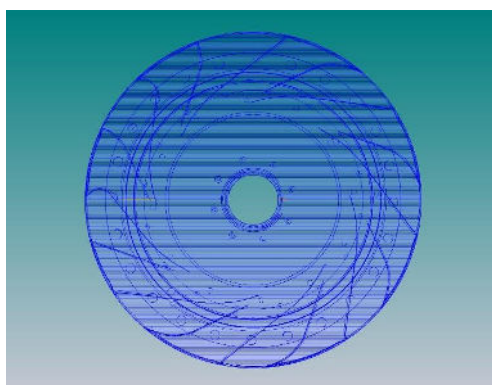


Obr. 1 Vývojový diagram aplikácie reverzného inžinieringu.

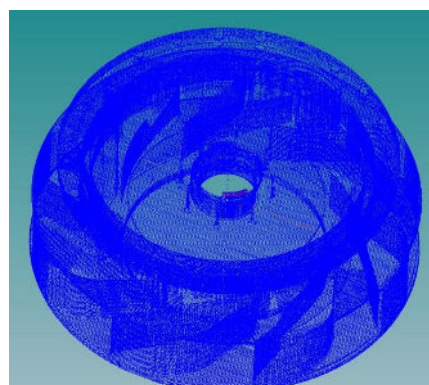
Ak má realizátor reverzného inžinieringu potvrdené, že má dostatok údajov na jeho realizáciu, pristupuje sa k samotnému výkonu činností, ktoré sa dajú rozdeliť na nasledovné položky:

1. 3D Skenovanie (tvorba mraku bodov)
2. Tvorba a úprava trojuholníkových sietí
3. Tvorba alebo aktualizácia CAD modelov
4. Príprava výkresovej dokumentácie
5. Virtuálna montáž
6. Príprava výroby
7. Výroba, kontrola kvality

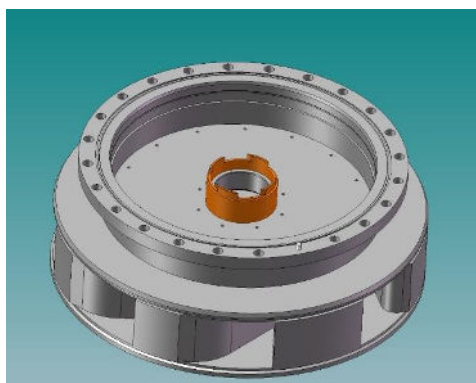
Obr. 2 dokumentuje príklad položiek 1,2, 3 a 4 na vyššie uvedenom zozname.



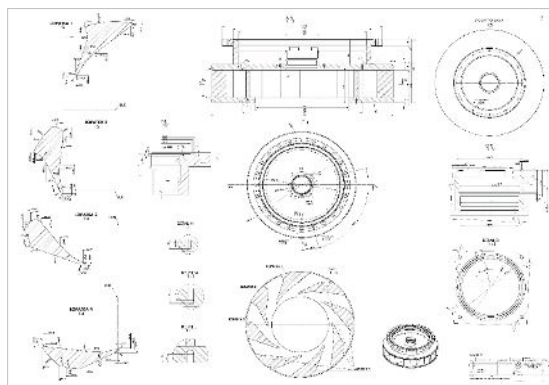
1



2



3



4

Obr. 2 Reverzný inžiniering rozvážacieho kolesa hlavného cirkulačného čerpadla primárneho okruhu JE (zdroj VÚZ).

Aditívna výroba a reverzný inžiniering

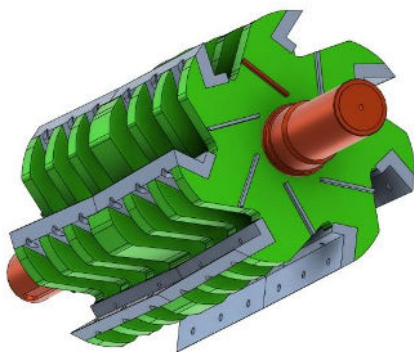
Aditívna výroba má s reverzným inžinieringom špecifický vzťah. Aditívna výroba sa dá aplikovať všade tam, kde je požiadavka rýchlo vyrobiť relatívne zložitý tvar dielu, respektíve jeho časti, pričom najdôležitejšiu úlohu hrá časový faktor. Typický príklad je identifikácia poškodeného dielu alebo časti výrobného zariadenia počas krátkodobej odstávky. Dodacia doba tradične vyrábaného dielu (odliatok, výkovok, obrobok) je niekoľko mesiacov. Pomocou vhodnej aplikácie reverzného inžinieringu a aditívnej výroby sa môže doba výroby náhradného dielu respektíve opravy časti zariadenia skrátiť na niekoľko dní.

Obr. 3 dokumentuje náročnú opravu drviča s fatálnym poškodením pracovných plôch. Zákazník sa po zvážení ekonomických a časových hľadísk rozhodol aplikovať prístup reverzného inžinieringu (viď Obr. 2 a Obr. 3), na základe ktorého bol vytvorený model drviča (Obr. 3 a b), ktorý bol počítačovo spojený so scanom jeho reálneho stavu (Obr. 3 c). Súčasťou

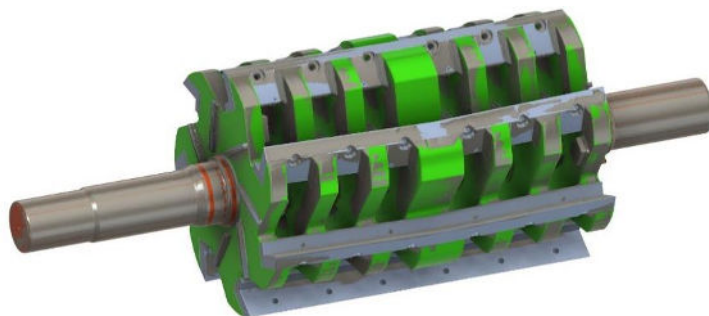
reverzného inžinieringu bola aj pozitívna identifikácia materiálu drviča a analýza prevádzkovej histórie vrátane analýzy príčiny poškodenia. Na základe takto získaného podkladu bola navrhnutá a overená technológia opravy naváraním chýbajúcich častí. Takýmto spôsobom sa dajú aditívne opraviť aj oveľa rozsiahlejšie poškodenia, respektíve úplne nahradiť chýbajúce časti komponentu. V hraničnom prípade sa da takýmto spôsobom vyrobiť za krátky čas celý komponent.



a) 3D scan drviča



b) Model vytvorený spätným inžinieringom



c) Počítačové prepojenie reálneho scanu a modelu vytvoreného spätným inžinieringom

Obr. 3 3D scan poškodeného drviča (zdroj VÚZ).

Záver

Príspevok:

1. načrtáva úvahy ako a kedy použiť reverzný inžiniering na dielce a komponenty výrobných zariadení,
2. uvádza zjednodušený pohľad ako analyzovať náklady a pristupovať k rizikám reverzného inžinieringu,
3. definuje základné postupy pri reverznom inžinieringu,
4. uvádza konkrétny prípad reverzného inžinieringu spojeného s aditívnou výrobou.

REJSTŘÍK AUTORŮ

Kolektiv autorů

Sborník z 17. konference

„Životnost komponent energetických zařízení“

Srní, 18. – 20. října 2022

Západočeská univerzita v Plzni

Vydavatelství

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach a Lukáš Stuna

Počet stran: 255

Vydání první

Náklad: 180 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Pavel Polach, Petr Zuna, Martin Krondák a Radovan Šťastný

ISBN 978-80-261-1109-2

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2022