

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

**ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT
ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ
V ELEKTRÁRNÁCH**

Srní
24. – 26. září 2019

Kolektiv autorů

Sborník z 14. konference

„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“

Srní, 24. – 26. září 2019

ISBN 978-80-261-0885-6

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2019

ODBORNÍ GARANTI

Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR

Dr. Ing. Pavel Polach – VZÚ Plzeň

PROGRAMOVÝ VÝBOR

Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR

Dr. Ing. Pavel Polach – VZÚ Plzeň

Ing. Václav Liška, CSc. – VZLÚ, a. s.

Prof. Ing. František Hrdlička, CSc. – ČVUT v Praze, FS

Mgr. Aleš Laciok, MBA – ČEZ, a. s.

Ing. Radovan Šťastný – ČEZ, a. s.

Ing. Jan Zdebor, CSc. – ZČU v Plzni, FS

Ing. Martin Krondák, Ph.D. – ÚJV Řež, a. s.

ORGANIZAČNÍ VÝBOR

Jana Miksanová – VZÚ Plzeň

Lenka Lopatková – VZÚ Plzeň

GENERÁLNÍ PARTNEŘI



ÚJV Řež, a. s.

HLAVNÍ PARTNEŘI





MEDIÁLNÍ PARTNEŘI



ODBORNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE

ÚTERÝ 24. 9. 2019 (ODPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Perspektivní a netradiční přístupy pro podporu spolehlivého provozu energetických zařízení

Garant: prof. Ing. František Hrdlička, CSc., FEng.

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Využití počítačové modelování v energetickém strojírenství & Projekty VaV

Garant: Dr. Ing. Pavel Polach, FEng.

STŘEDA 25. 9. 2019 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů

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

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika primárního okruhu jaderných elektráren (se zaměřením na materiálovou problematiku)

Garant: prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

ČTVRTEK 26. 9. 2019 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Praktická aktuální témata využitelná při provozu klasických tepelných elektráren

Garant: Ing. Radovan Štastný

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Vybrané problémy z diagnostiky & Problematika primárního okruhu jaderných elektráren (se zaměřením na jadernou problematiku)

Garant: Ing. Václav Liška, CSc., FEng.

PŘEDMLUVA

Vážené dámy, vážení pánové,

Životnost a spolehlivost provozu energetických zařízení představuje klíčové téma nejenom z pohledů ekonomické výnosnosti a rentability, ale současně energetické soběstačnosti a dlouhodobé udržitelnosti energetické koncepce České republiky. Ačkoliv stále přibývají alternativní řešení generování elektrické energie, jejich účinnost a potenciál k nahrazení současných zdrojů ve středně i dlouhodobém horizontu prozatím nenaplnuje jejich počáteční ambice.

Na tuto skutečnost je potřeba reagovat kontinuálním zvyšováním bezpečné a spolehlivé délky provozu existujících energetických zdrojů s primárním důrazem na sledování a v ideálním případě prodlužování životnosti klíčových komponent a soustav.

Tento trend velmi dobře potvrzuje také zájem, o již čtrnáctý ročník konference v Srní, kdy jsme do programu zařadili rekordní počet odborných příspěvků, celkem čtyřicet čtyři.

Oproti předchozímu ročníku došlo k úpravám technického zaměření jednotlivých bloků přednášek. Úvodní část konference je zaměřena na perspektivní a netradiční přístupy pro podporu spolehlivého provozu energetických zařízení a využití počítačové modelování v energetickém strojírenství. Střední program je věnován degradaci mechanických vlastností konstrukčních materiálů a problematice primárního okruhu jaderných elektráren. Čtvrteční blok přednášek bude zahájen sekcí zaměřenou na praktická aktuální témata využitelná při provozu klasických tepelných elektráren v závěr konference bude patřit vybraným problémům z diagnostiky a problematiky primárního okruhu jaderných elektráren.

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

Těším se na viděnou.

Stanislav Martínek

PROGRAM 14. ROČNÍKU KONFERENCE ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ V ELEKTRÁRNÁCH

Úterý, 24. září 2019

Registrace účastníků v hotelu Srní u recepce, 8.00 – 18.00

Oběd v hotelu Srní, 11.15 – 12.15

Zahájení konference (sál v hotelu Šumava), 12.30

	Úvod a zahájení konference S. Martínek (VZÚ Plzeň), P. Zuna (ČVUT v Praze a IA ČR), D. Jiříčka (ÚJV Řež, a. s.), představitel ČEZ, a. s., P. Polach (VZÚ Plzeň – organizační pokyny)
--	---

13.00 – 13.15	P. Zuna, Aktuální informace o VaV
---------------	-----------------------------------

1. odpolední blok přednášek – František Hrdlička (ČVUT v Praze, FS), 13.15 – 15.15

13.15 – 13.30	Prezentace společnosti ÚJV Řež, a. s.
13.30 – 13.45	J. Raška a kol., Bezpečnost energetických zařízení vůči extrémním klimatickým jevům – Experimentální a numerická analýza poškození nárazem letících těles
13.45 – 14.00	J. Veselý a P. Mareš, Prvotní výsledky ultrazvukového zkoušení nástřiku Cold Spray a sklolaminátů v rámci projektu NCK – Povrchové úpravy
14.00 – 14.15	J. Janovec a kol., Vývoj a vlastnosti termálních metalických nástřiků k prodloužení životnosti komponent spaloven, tepláren a energetických celků
14.15 – 14.30	D. Dopjera a Z. Brláš, Napredovanie v NDT metodach ET a PAUT
14.30 – 14.45	J. Švestka, Sledování provozního stavu asynchronních motorů diagnostickou metodou MCSA
14.45 – 15.00	L. Smolík a R. Pašek, Měření vibrací vysokorychlostní kamerou

Diskuse k předneseným příspěvkům, 15.00 – 15.15

Občerstvení, 15.15 – 15.25

2. odpolední blok přednášek – Pavel Polach (VZÚ Plzeň), 15.25 – 18.00

15.25 – 15.45	Prezentace společnosti PAPco s.r.o.
15.45 – 16.05	Prezentace společnosti STARMANS electronics, s.r.o.
16.05 – 16.20	S. Veselý, Zvýšení životnosti a spolehlivosti provozu spalovacích komor s hybridními hořáky
16.20 – 16.35	M. Schuster, Simulace přestupu tepla v modelu ucpávky páry
16.35 – 16.50	P. Polcar a kol., Výpočtové hodnocení opěrných prvků jaderných reaktorů
16.50 – 17.05	M. J. Černý, Nízkotlaké části parních turbín při neustálených podmínkách v přenosové soustavě ČR
17.05 – 17.20	J. Brom a kol., VaV projekty CVŘ pro oblasti nedestruktivních metod a povrchových úprav
17.20 – 17.35	A. Kobzová a kol., VaV projekt: Optimalizace korozních jevů v rozvodech a chemická stabilizace vod chladících okruhů JE Dukovany
17.35 – 17.50	P. Polach a kol., Vybrané výsledky řešení projektu CESEN

Diskuse k předneseným příspěvkům, 17.50 – 18.00

Slavnostní večeře v hotelu Srní, 19.00

Středa, 25. září 2019	
Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15	
1. dopolední blok přednášek – Petr Zuna (ČVUT v Praze, FS, IA ČR), 8.30 – 10.55	
8.30 – 8.45	J. Horváth a kol., Návrh a rozbor tepelného zpracování oceli SUPER 304H pro odstranění vyprecipitované sigma fáze
8.45 – 9.00	J. Dvořák a kol., Detekce poruch pomocí akustické emise (AE) v podmínkách vysoko-teplotního creepu
9.00 – 9.15	J. Bystrianský a kol.: Podmínky dlouhodobé životnosti svarových spojů v energetických zařízeních – vliv pracovního prostředí
9.15 – 9.30	J. Čech a kol., Charakterizace heterogenních svarových spojů
9.30 – 9.45	M. Vojna a kol., Expozice heterogenních svarových spojů prostředí vody sekundárního okruhu
9.45 – 10.00	T. Vlasák a kol., Vliv tváření na mechanické a creepové vlastnosti martenzitických ocelí
10.00 – 10.15	Z. Kuboň a L.Kander, Homogenita struktury a vlastností tlustostěnných výrobků z oceli P92
10.15 – 10.30	J. Strejcius a kol., Korozně únavové vlastnosti oceli 13%Cr4%Ni pro komponenty vodních turbín
10.30 – 10.45	M. Svobodová a kol., Korozní chování austenitické žárovevne 18Cr-10Ni oceli v závislosti na typu chemické a strukturní modifikace
Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.45 – 10.55	
Občerstvení, 10.55 – 11.10	
2. dopolední blok přednášek – Václav Mentl (ZČU v Plzni, FS), 11.10 – 13.40	
11.10 – 11.30	Prezentace společnosti EUTIT s.r.o.
11.30 – 11.45	Z. Skála, Ultrazvukové zkoušení obvodových svarových spojů HCP DN 850
11.45 – 12.00	P. Ducháček a kol., Hodnocení kvality provozovaného heterogenního svarového spoje mezi hlavním cirkulačním čerpadlem a hlavním cirkulačním potrubím s aplikací Transcopy replik
12.00 – 12.15	J. Ertl, Vyhodnocení odběru návaru tlakové nádoby reaktoru na třetím bloku JE Dukovany
12.15 – 12.30	J. Žďárek a kol., Hodnocení integrity TNR v rámci aplikace strategie udržení Coria při těžké havárii. Návrh projektu OECD/NEA CAPS a vazba na experiment IVMR.
12.30 – 12.45	P. Vlček a kol., Vývoj a výroba měřicího systému pro zjišťování změn geometrie pláště aktivní zóny VČR VVER 1000 vyvolané degradačním mechanismem radiačního bobtnání
12.45 – 13.00	P. Brabec a kol., Změny složení a porozity zrn titanového houbového filtru média primárního okruhu SVO-1 po dlouhodobém provozu na ETE
13.00 – 13.15	P. Bročko, Proaktivní přístup k řízení „Technologického zastarávání“
13.15 – 13.30	M. Adamech a kol., Medzilaboratórne porovnávacie testy SPT metódy pre jej použitie pri stanovovaní mechanických vlastností materiálov používaných v jadrovej energetike
Diskuse k předneseným příspěvkům, 13.30 – 13.40	
Oběd v hotelu Srní, 13.40 – 14.30	
Večeře a neformální večer v hotelu Srní (bowlingový turnaj „O krále hotelů Šumava a Srní“) – od 18.30	

Čtvrtek, 26. září 2019

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

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

8.30 – 8.45	M. Holický, Hodnocení životnosti energetických zařízení v elektrárnách
8.45 – 9.00	J. Valášek a kol., Hodnocení rizika uložení potrubních systémů
9.00 – 9.15	M. Švantner a kol., Vysokorychlostní termografická diagnostika rotačních dílů energetických zařízení
9.15 – 9.30	P. Mareš a kol., Problematika měření tečení parovodů
9.30 – 9.45	J. Brajer a kol., Zvýšení únavové životnosti materiálů metodou Laser Shock Peening
9.45 – 10.00	P. Cvešpr, LTOs – datová základna pro řízení životnosti zařízení
10.00 – 10.15	K. Kaleta, Opravy těles ventilů parních turbín svařováním
10.15 – 10.30	L. Horváth a kol., Odvrtný vzorek z kritické části tlakového systému kotle a jeho informační potenciál

Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.30 – 10.45

Občerstvení, 10.45 – 11.00

2. dopolední blok přednášek – Václav Liška (VZLÚ), 11.00 – 12.25

11.00 – 11.15	M. Rohlová a kol., Hodnocení vlivu třískového obrábění na mikrostrukturní vlastnosti žárovevné niklové slitiny
11.15 – 11.30	T. Soukup, Jaderné opravárenství v praxi: Rekonstrukce rozvodu napájecí vody parogenerátorů typu VVER 440/1000 na JE Dukovany/Temelín
11.30 – 11.45	D. Tonarová a kol., Hodnocení předpínacích kabelů vyjmutých z kontejnmentu ETE
11.45 – 12.00	M. Žamboch a kol., Program řízení stárnutí vnitřních částí reaktorů VVER pro zajištění LTO +30
12.00 – 12.15	M. Kronďák a kol., Pasivace primárního okruhu 3. bloku JE Mochovce v průběhu horkých hydrozkoušek

Diskuse k předneseným příspěvkům a ukončení konference, 12.15 – 12.25

Oběd v hotelu Srní, 12.30 – 13.30

Postery

V průběhu přestávek

Z. Bunda a kol., Zobrazení tahové zkoušky oceli ČSN 416236 z rotoru parní turbíny in-situ v ŘEM
I. Eliášová a kol., Návrh optimálního režimu žíhání vnitřních částí reaktoru VVER 440 pro zajištění dlouhodobého provozu
M. Chocholoušek a kol., Zařízení pro zkušebnictví v prostředí těžkých tekutých kovů

OBSAH

ODBOBNÍ GARANTI	III
PROGRAMOVÝ VÝBOR	III
ORGANIZAČNÍ VÝBOR	III
GENERÁLNÍ PARTNEŘI	IV
HLAVNÍ PARTNEŘI	IV
MEDIÁLNÍ PARTNEŘI	V
ODBOBNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE	VII
PŘEDMLUVA	VIII
PROGRAM 14. ROČNÍKU KONFERENCE ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ V ELEKTRÁRNÁCH.....	IX
OBSAH	XII
BEZPEČNOST ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ VŮČI EXTRÉMNÍM KLIMATICKÝM JEVŮM – EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA POŠKOZENÍ NÁRAZEM LETÍCÍCH TĚLES	1
POWER PLANT SAFETY VIS-A-VIS THE EXTREME CLIMATIC EVENTS – EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE DAMAGE DUE TO THE FLYING BODIES IMPACT	1
JAN RAŠKA A RADEK DOUBRAVA	1
PRVOTNÍ VÝSLEDKY ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ NÁSTŘIKU COLD SPRAY A SKLOLAMINÁTŮ V RÁMCI PROJEKTU NCK – POVRCHOVÉ ÚPRAVY	7
PRIMARY RESULTS OF ULTRASONIC TESTING OF COLD SPRAY AND FIBREGLASSES IN THE NCK PROJECT SOLVING – SURFACE TREATMENT	7
JANA VESELÁ A PAVEL MAREŠ	7
VÝVOJ A VLASTNOSTI TERMÁLNÍCH METALICKÝCH NÁSTŘIKŮ K PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT SPALOVEN, TEPLÁREN A ENERGETICKÝCH CELKŮ	11
DEVELOPMENT AND CHARACTERISTICS OF THERMAL METALLIC SPRAYS TO EXTEND THE LIFE OF THE COMPONENTS OF COMBUSTION PLANTS, HEATING PLANTS AND ENERGY UNITS	11
JIŘÍ JANOVEC, JAKUB HORVÁTH A MICHAL JUNEK	11
NAPREDOVANIE V NDT METÓDACH ET A PAUT.....	17
THE PROGRESS IN THE NDT METHODS ET AND PAUT	17
DANIEL DOPJERA A ZDENĚK BRLÁŠ	17
SLEDOVÁNÍ PROVOZNÍHO STAVU ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ DIAGNOSTICKOU METODOU MCSA.....	23
CONDITION MONITORING OF ASYNCHRONOUS MOTORS USING THE MCSA METHOD	23
OTO MAREČEK, MILOŠ KAŠKA A JIŘÍ ŠVESTKA	23
MĚŘENÍ VIBRACÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU	27
VIBRATION MEASUREMENT USING A HIGH-SPEED CAMERA.....	27
LUBOŠ SMOLÍK A ROMAN PAŠEK	27
ZVÝŠENÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI PROVOZU SPALOVACÍCH KOMOR S HYBRIDNÍMI HOŘÁKY	31
LIFETIME PROLONGING AND OPERATIONAL RELIABILITY OF THE COMBUSTION CHAMBERS WITH HYBRID BURNER	31
STANISLAV VESELÝ.....	31
SIMULACE PŘESTUPU TEPLA V MODELU UCPÁVKY PÁRY	35

HEAT-TRANSFER SIMULATIONS IN MODEL OF STEAM SEALING	35
MILAN SCHUSTER	35
VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ OPĚRNÝCH PRVKŮ JADERNÝCH REAKTORŮ.....	41
COMPUTATIONAL EVALUATION OF NUCLEAR REACTORS SUPPORT ELEMENTS	41
JAN LAZAR, KAMIL ŠIMEČEK, PETR POLCAR A PETR KINDELMANN	41
NÍZKOTLAKÉ ČÁSTI PARNÍCH TURBÍN PŘI NEUSTÁLENÝCH PODMÍNKÁCH V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČR	47
LP PARTS OF STEAM TURBINES AT NONSTEADY CONDITIONS IN CZECH ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS	47
MIROSLAV J. ČERNÝ	47
VaV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI NEDESTRUKTIVNÍCH METOD A POVRCHOVÝCH ÚPRAV.....	51
R&D PROJECTS FOR NON-DESTRUCTIVE METHODS AND SURFACE TREATMENT	51
JAROSLAV BROM, PAVEL MAREŠ, JANA VESELÁ, JAN PATERA, ROMAN MOHYLA A MICHAL CHOCHOLOUŠEK.....	51
VaV PROJEKT: OPTIMALIZACE KOROZNÍCH JEVŮ V ROZVODECH A CHEMICKÁ STABILIZACE VOD CHLADÍCÍCH OKRUHŮ JE DUKOVANY	57
R&D PROJECT: THE OPTIMALIZATION OF CORROSION PROCESSES IN THE SYSTEMS AND WATER CHEMISTRY STABILIZATION OF COOLING WATER SYSTEMS IN NPP DUKOVANY	57
ALENA KOBZOVÁ, HELENA ČÍHALOVÁ, TEREZA ŠOBOVÁ, DALIBOR KÁRNÍK, MARTIN SKALA, PAVEL KŮS A JAKUB VYVADIL	57
VYBRANÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PROJEKTU CESEN	61
SELECTED RESULTS OF THE CESEN PROJECT SOLVING.....	61
PAVEL POLACH, ŠÁRKA HOUDKOVÁ A MICHAL HAJŽMAN	61
NÁVRH A ROZBOR TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELI SUPER 304H PRO ODSTRANĚNÍ VYPRECIPITOVANÉ SIGMA FÁZE	69
DESIGN AND ANALYSIS OF THE HEAT TREATMENT FOR DISSOLVING OF SIGMA PHASE IN EXPOSED STEEL SUPER 304H	69
JAKUB HORVÁTH, MICHAL JUNEK, JIŘÍ JANOVEC, MARIE ROHLOVÁ, LUCIE PILSOVÁ A VOJTĚCH SMOLA	69
DETEKCE PORUCH POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE (AE) V PODMÍNKÁCH VYSOKOTEPLOTNÍHO CREEPU.....	75
DETECTION OF DEFECTS BY ACOUSTIC EMISSIONS (AE) UNDER HIGH-TEMPERATURE CREEP CONDITIONS....	75
JIŘÍ DVOŘÁK, VÁCLAV SKLENIČKA, PETR KRÁL, MARIE KVAPILOVÁ, MARIE SVOBODOVÁ, JAN ŠIFNER A VÁCLAV KOULA.....	75
PODMÍNKY DLOUHODOBÉ ŽIVOTNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ V ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍCH – VLIV PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ	81
CONDITIONS FOR LONG-TERM DURABILITY OF DISSIMILAR METAL WELDS OF POWER PLANTS – ENVIRONMENTAL EFFECT.....	81
JAROSLAV BYSTRIANSKÝ, MIROSLAVA ERNESTOVÁ, PETR HAUŠILD, JAN SIEGL A LUBOMÍR JUNEK	81
CHARAKTERIZACE HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ	89
CHARACTERIZATION OF DISSIMILAR METAL WELDS.....	89
JAROSLAV ČECH, PETR HAUŠILD, JAN SIEGL, LUBOMÍR JUNEK, MIROSLAVA ERNESTOVÁ A JAROSLAV BYSTRIANSKÝ	89
EXPOZICE HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ PROSTŘEDÍ VODY SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU	93
EXPOSURE OF DISSIMILAR METAL WELDS TO SECONDARY WATER ENVIRONMENT.....	93
MARTIN VOJNA, MIROSLAVA ERNESTOVÁ, DANA TONAROVÁ, LUBOMÍR JUNEK, JAROSLAV BYSTRIANSKÝ, PETR HAUŠILD, JAN SIEGL A ZDENĚK ČANČURA	93
VLIV TVÁŘENÍ NA MECHANICKÉ A CREEPOVÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÝCH OCELÍ	99

INFLUENCE OF FORGING ON MECHANICAL AND CREEP PROPERTIES OF MARTENSITIC STEEL	99
TOMÁŠ VLASÁK, ŠÁRKA NEUMANNOVÁ, JAN HAKL, JAN ČECH A PAVEL RŮŽIČKA	99
HOMOGENITA STRUKTURY A VLASTNOSTÍ TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ Z OCELI P92	103
HOMOGENEITY OF THE STRUCTURE AND CPROPERTIES OF THICK-WALLED PRODUCTS MADE OF P92 STEEL	103
ZDENĚK KUBOŇ A LADISLAV KANDER	103
KOROZNĚ ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI OCELI 13%CR4%NI PRO KOMPONENTY VODNÍCH TURBÍN.....	109
CORROSION-FATIGUE PROPERTIES OF 13%CR4%NI STEEL FOR HYDROTURBINE COMPONENTS	109
JOSEF STREJCIUS, ZBYNĚK ŠPIRIT A ZDENĚK FULÍN	109
KOROZNÍ CHOVÁNÍ AUSTENITICKÉ ŽÁROPEVNÉ 18CR-10NI OCELI V ZÁVISLOSTI NA TYPU CHEMICKÉ A STRUKTURNÍ MODIFIKACE	115
CORROSION BEHAVIOUR DEPENDING ON CHEMICAL AND MICROSTRUCTURE MODIFICATION OF AUSTENITIC CREEP-RESISTANT 18CR-10NI STEEL	115
MARIE SVOBODOVÁ, JOSEF ČMAKAL A JINDŘICH DOUDA.....	115
HODNOCENÍ KVALITY PROVOZOVANÉHO HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE MEZI HLAVNÍM CÍRKULAČNÍM ČERPADLEM A HLAVNÍM CÍRKULAČNÍM POTRUBÍM S APLIKACÍ TRANSPCOPY REPLIK.....	121
EVALUATION QUALITY OF HETEROGENEOUS WELDED JOINT BETWEEN THE MAIN CIRCULATION PUMP AND THE MAIN CIRCULATION PIPELINE WITH THE APPLICATION TRANSPCOPY REPLICAS	121
PETR DUCHÁČEK, MAREK PALÁN A ZDENĚK ČANČURA	121
VYHODNOCENÍ ODBĚRU NÁVARU TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU NA TŘETÍM BLOKU JE DUKOVANY.....	125
ASSESSMENT OF REACTOR PRESSURE VESSEL CLADDING SAMPLING PERFORMED IN DUKOVANY NPP	125
JAKUB ERTL.....	125
HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V RÁMCI APLIKACE STRATEGIE UDRŽENÍ CORIA PŘI TĚŽKÉ HAVÁRII. NÁVRH PROJEKTU OECD/NEA CAPS A VAZBA NA EXPERIMENT IVMR.	129
THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT WITH RESPECT TO THE CORIUM RETENTION DURING SA. THE OECD/NEA CAPS PROJECT PROPOSAL AND RELATION TO THE IVMR EXPERIMENT.	129
JIŘÍ ŽDÁREK, JAN WANDROL, VLADISLAV PIŠTORA, PETR GÁL, VLADIMÍR KRHOUNEK A DAVID BÁTĚK	129
VÝVOJ A VÝROBA MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZMĚN GEOMETRIE PLÁŠTĚ AKTIVNÍ ZÓNY VČR VVER 1000 VYVOLANÉ DEGRADAČNÍM MECHANISMEM RADIAČNÍ BOBTNÁNÍ.....	135
DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF MEASURING SYSTEM FOR DETERMINATION GEOMETRY CHANGES BY CORE BAFFLE, REACTOR INTERNALS TYPE OF VVER 1000 CAUSED BY RADIATION SWELLING.....	135
PETR VLČEK, PETR VOMÁČKA A MIROSLAV ŽAMBOCH.....	135
ZMĚNY SLOŽENÍ A POROZITY ZRN TITANOVÉHO HOUBOVÉHO FILTRU MÉDIA PRIMÁRNÍHO OKRUHU SVO-1 PO DLOUHODOBÉM PROVOZU NA ETE	141
COMPOSITION AND POROSITY CHANGES OF TITANIUM GRAINS OF THE FILTER SVO-1 DEPURATING PRIMARY CIRCUIT MEDIA IN TEMELIN NPP AFTER LONG TERM OPERATION.....	141
PETR BRABEC, ZDENĚK FENCL A LIBOR TOMEK.....	141
PROAKTIVNÍ PŘÍSTUP K ŘÍZENÍ „TECHNOLOGICKÉHO ZASTARÁVÁNÍ“	145
TECHNOLOGICAL OBSOLESCENCE PROGRAMME	145
PETER BROČKO	145
MEDZILABORATÓRNE POROVNÁVACIE TESTY SPT METÓDY PRE JEJ POUŽITIE PRI STANOVOVANÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLOV POUŽÍVANÝCH V JADROVEJ ENERGETIKE	147

THE ROUND ROBIN TEST OF THE SPT METHOD FOR ITS USE IN THE ASSESMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF POWER PLANTS MATERIALS.....	147
MAREK ADAMECH, JANA PETZOVÁ, RADIM KOPŘIVA, ZDENĚK FENCL A DANIEL OMACHT	147
HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ V ELEKTRÁRNÁCH	151
ASSESSMENT OF COMPONENTS SERVICE LIFE IN POWER INDUSTRY	151
MILAN HOLICKÝ.....	151
HODNOCENÍ RIZIKA ULOŽENÍ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ	157
RISK ASSESSMENT OF PIPING SUPPORT SYSTEMS	157
JIŘÍ VALÁŠEK, LUKÁŠ JUNEK, JIŘÍ LUKÁŠ A RADOVAN ŠŤASTNÝ	157
VYSOKORYCHLOSTNÍ TERMOGRAFIKÁ DIAGNOSTIKA ROTAČNÍCH DÍLŮ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....	163
HIGH SPEED THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF ROTATING PARTS OF POWER EQUIPMENT	163
MICHAL ŠVANTNER, JIŘÍ TESAŘ A D. MARTIN BURŠÍK.....	163
PROBLEMATIKA MĚŘENÍ TEČENÍ PAROVODŮ.....	165
CREEP MEASUREMENT OF STEAM PIPING	165
JAN PATERA, PAVEL ZAHŘÁDKA, JAN MATĚJČEK A PAVEL MAREŠ	165
ZVÝŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ METODOU LASER SHOCK PEENING.....	171
INCREASE OF MATERIAL CYCLE FATIGUE LIFE TIME USING THE LASER SHOCK PEENING METHOD.....	171
ZBYNĚK ŠPIRIT, JAN KAUFMAN, JAN BRAJER, JOSEF STREJCIUS A MICHAL CHOCHOLOUŠEK	171
LTOs – DATOVÁ ZÁKLADNA PRO ŘÍZENÍ ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ.....	177
LTOs – DATABASE FOR LIFE CONTROL OF EQUIPMENT.....	177
PAVEL CVEŠPR.....	177
OPRAVY TĚLES VENTILŮ PARNÍCH TURBÍN SVAŘOVÁNÍM	181
WELDING REPAIR OF STEAM TURBINE VALVE BODIES.....	181
KAREL KALETA	181
ODVRTANÝ VZOREK Z KRITICKÉ ČÁSTI TLAKOVÉHO SYSTÉMU KOTLE A JEHO INFORMAČNÍ POTENCIÁL	185
THE INFORMATION POTENTIAL OF DRILLED OUT SAMPLE FROM CRITICAL AREA OF HIGH PRESSURE BOILER PART	185
LADISLAV HORVÁTH, JAKUB HORVÁTH, PAVEL KONOPÍK, EVA CHVOSTOVÁ A MARTIN RUND	185
HODNOCENÍ VLIVU TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ NA MIKROSTRUKTURNÍ VLASTNOSTI ŽÁROPEVNÉ NIKLOVÉ SLITINY	191
INFLUENCE OF THE MACHINING TO THE MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF CREEP RESISTANT NICKEL BASED SUPERALLOY	191
MARIE ROHLOVÁ, MICHAL SLANÝ A JAKUB HORVÁTH	191
JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ V PRAXI: REKONSTRUKCE ROZVODU NAPÁJECÍ VODY PAROGENERÁTORŮ TYPU VVER 440/1000 NA JE DUKOVANY/TEMELÍN.....	195
NUCLEAR REPAIR ENGINEERING IN PRACTISE: RECONSTRUCTION OF FEED WATER PIPING OF STEAM GENERATORS OF WWER TYPE 440/1000 IN DUKOVANY AND TEMELIN NPP	195
TOMÁŠ SOUKUP	195
HODNOCENÍ PŘEDPÍNACÍCH KABELŮ VYJMUTÝCH Z KONTEJNMENTU ETE	201
EVALUATION OF PRESTRESSED CABLES REMOVED FROM NPP TEMELIN CONTAINMENT	201

DANA TONAROVÁ, PETR BRABEC, ZDENĚK FENCL, MIROSLAV KRPEC A ANTONÍN ŠIK	201
PROGRAM ŘÍZENÍ STÁRNUTÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORŮ VVER PRO ZAJIŠTĚNÍ LTO +30.....	207
AGING MANAGEMENT PROGRAM OF VVER RPV INTERNALS FOR LTO +30	207
MIROSLAV ŽAMBOCH, PETR VLČEK A ONDŘEJ PLÍHAL.....	207
PASIVACE PRIMÁRNÍHO OKRUHU 3. BLOKU JE MOCHOVCE V PRŮBĚHU HORKÝCH HYDROZKOUŠEK	213
PASSIVATION OF INTERNAL SURFACE OF REACTOR COOLANT SYSTEM OF NPP MOCHOVCE UNIT 3 AT HOT FUNCTIONAL TESTS	213
MARTIN KRONDÁK, PAVEL KŮS, MARTIN SKALA, ALENA KOBZOVÁ, PETR BRABEC, PATRICIE HALODOVÁ, ZBYNĚK VESELKA, JANKA MIHÓKOVÁ A ŠTEFAN TKÁČ	213
MODULÁRNÍ MANIPULÁTOR ILJA PRO VIZUÁLNÍ INSPEKCI	217
VISUAL INSPECTION MODULAR MANIPULATOR ILJA.....	217
JINDŘICH JANSÁ A JIŘÍ KANTA	217
ZOBRAZENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY OCELI ČSN 416236 Z ROTORU PARNÍ TURBÍNY IN-SITU V ŘEM.....	221
SEM IMAGING OF IN-SITU TENSILE TESTING OF STEAM TURBINE ROTOR STEEL CSN 416236	221
MARTIN BYSTRIANSKÝ, ZBYNĚK BUNDA, VÁCLAV MENTL, JOSEF VOLÁK A LUDMILA KUČEROVÁ	221
NÁVRH OPTIMÁLNÍHO REŽIMU ŽÍHÁNÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440 PRO ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU	227
DESIGN OF OPTIMAL THERMAL ANNEALING REGIME OF WWER-440 INTERNALS FOR PROVIDING A LONG-TERM OPERATION	227
IVANA ELIÁŠOVÁ, PETRA KLATOVSKÁ, RADIM KOPŘIVA, DANA TONAROVÁ A ALEŠ MATERNA	227
ZAŘÍZENÍ PRO ZKUŠEBNICTVÍ V PROSTŘEDÍ TĚŽKÝCH TEKUTÝCH KOVŮ	233
TESTING DEVICE FOR HEAVY LIQUID METAL ENVIRONMENT	233
MICHAL CHOCHOLOUŠEK, ZDENĚK FULÍN A ZBYNĚK ŠPIRIT	233
REJSTŘÍK AUTORŮ	237

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.

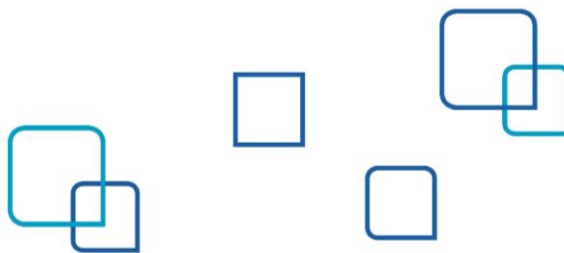
Díky našim zkušenostem a dodávaným technologiím si můžete být jisti, že ČEZ ESCO je investice do budoucna, která přináší chytrá řešení pro vaši společnost.

www.cezesco.cz

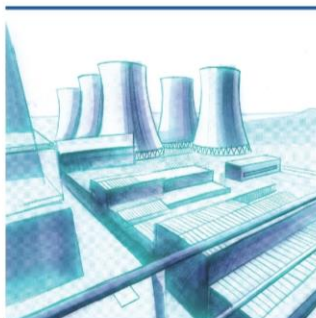


ČEZ ESCO

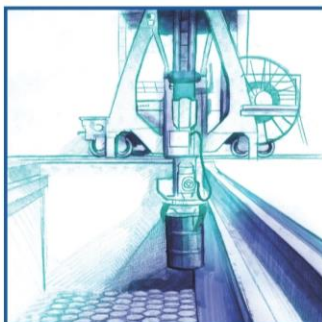
ENERGY
SERVICE
COMPANY



**Bezpečný
a efektivní
provoz
energetických
zařízení**



**Projektování
a související
inženýrské
služby**



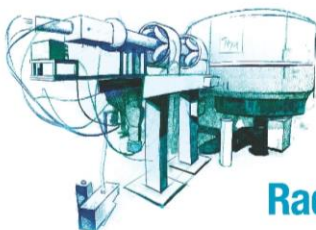
**Nakládání
s radioaktivními
i dalšími
odpady**



**Vyřazování
jaderných
zařízení
z provozu**



**Vodíkové
technologie**



Radiofarmaka





Centrum výzkumu Řež

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

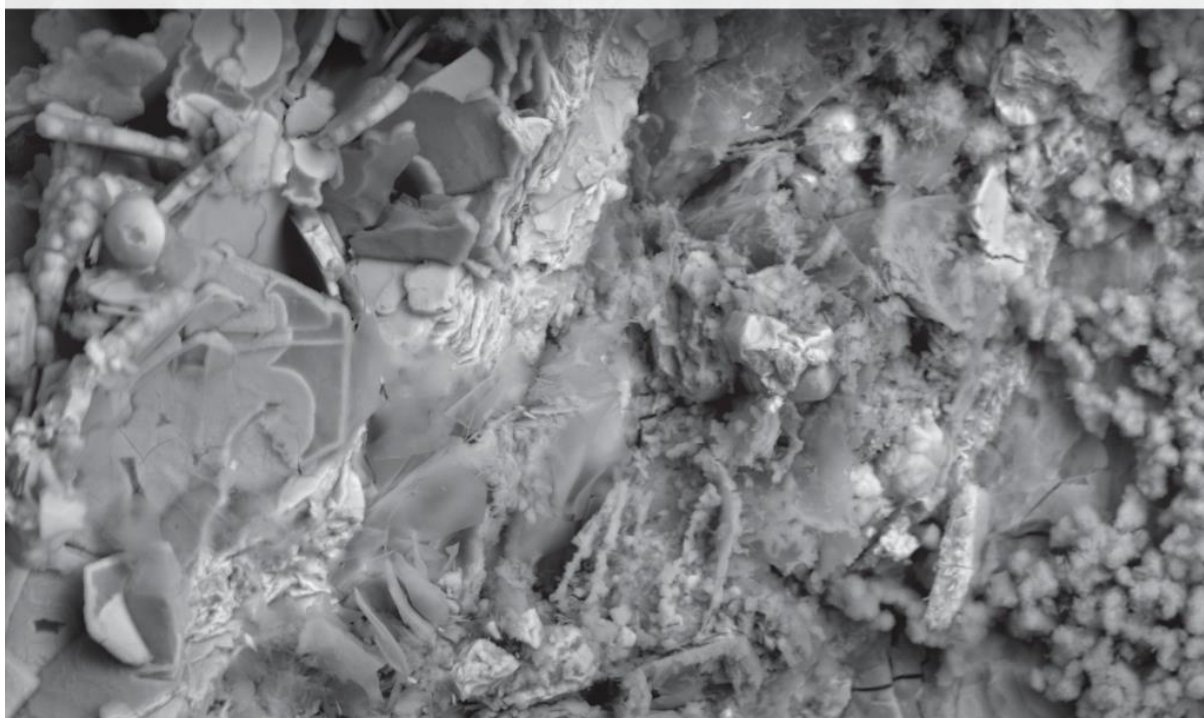
Výzkumná organizace zaměřená na výzkum, vývoj a inovace
v oboru energetiky, zejména jaderné.

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



OTĚRUVZDORNÉ APLIKACE

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



Zásobníky na dřevní štěpku - čedičový obklad

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



Původní opotřebovaná betonová stěna zásobníku



Vložkované otěruvzdorné a chemicky odolné díly

Ukázky otěruvzdorných dílů z čediče a Eucoru



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



společně, jako jeden tým, dodáváme

Teplo *z Komořan*

www.ue.cz

www.setep.cz



**TEPLÁRNA
OTROKOVICE**
LAMA energy group

**BEZPEČNÁ
SPOLEHLIVÁ
ENERGIE**

TEPLÁRNA OTROKOVICE a.s.

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

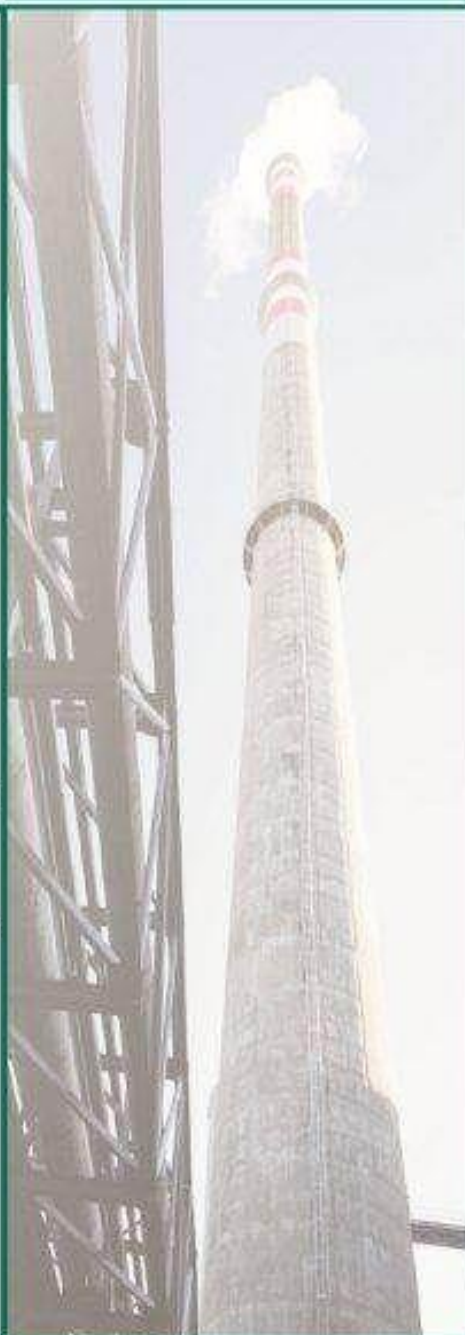
člen skupiny

LAMA ENERGY GROUP

**dodavatel plynu
dodavatel elektřiny
mobilní operátor**

www.tot.cz

www.lamagroup.cz





UnionOcel

Váš ocelový partner

Otěruvzdorné plechy

Plech, výpalky
a komponenty
v jakostech

XAR

DUROSTAT

DILLIDUR

BRINAR

BRINAR 400Cr

X120 Mn 12

300–600 HB

Speciální
návarové materiály

CORODUR

650–1000 HV

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

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

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

E-mail: info@unionocel.com



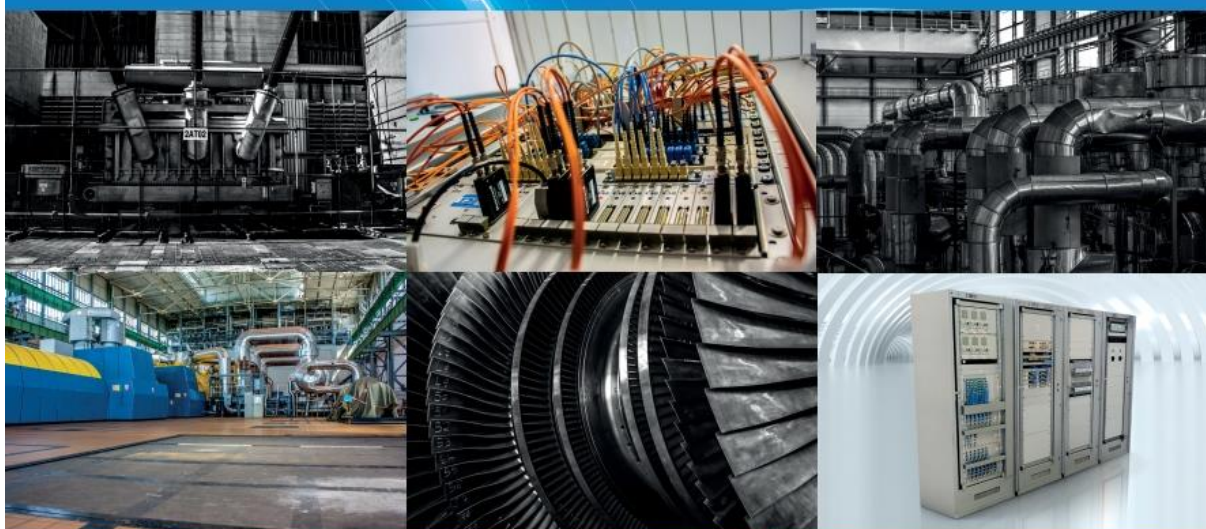
www.unionocel.com



www.tes.eu

Inženýrské služby v jaderné energetice

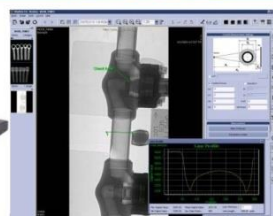
- Servis a údržba zařízení JE
- Deterministické analýzy bezpečnosti
- Monitorovací a diagnostické systémy
- Podpora spouštění a provozu JE
- Podpora jaderného dozoru



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

Digitální Rentgenová technika

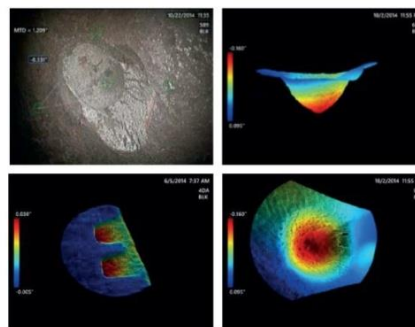
Online snímání
DDA panely
Systémy digitální
radiografie CR
Rentgenky a
generátory



Endoskopy s 3D zobrazením a měřením

MENTOR Visual IQ

Ca-Zoom® Pan Tilt Zoom kamery



Ultrazvuk

MENTOR UT – mapování koroze

PALM a FLAT Scannery

DMS Go+, USM Go+

Phased Array sondy

Online snímače



Inspekční roboti

Mapování koroze
Kontrola svarů
Visuální kontrola
nedostupných
míst





ŠKODA JS a.s.

Jsme silou jaderného strojírenství

www.skoda-js.cz





Člen federace evropských materiálových společností – FEMS

<http://www.csnmt.cz>

Zaměření činnosti a cíle společnosti

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

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

Odborné tematické oblasti

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

Organizační uspořádání společnosti

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

Hlavní trvalé aktivity

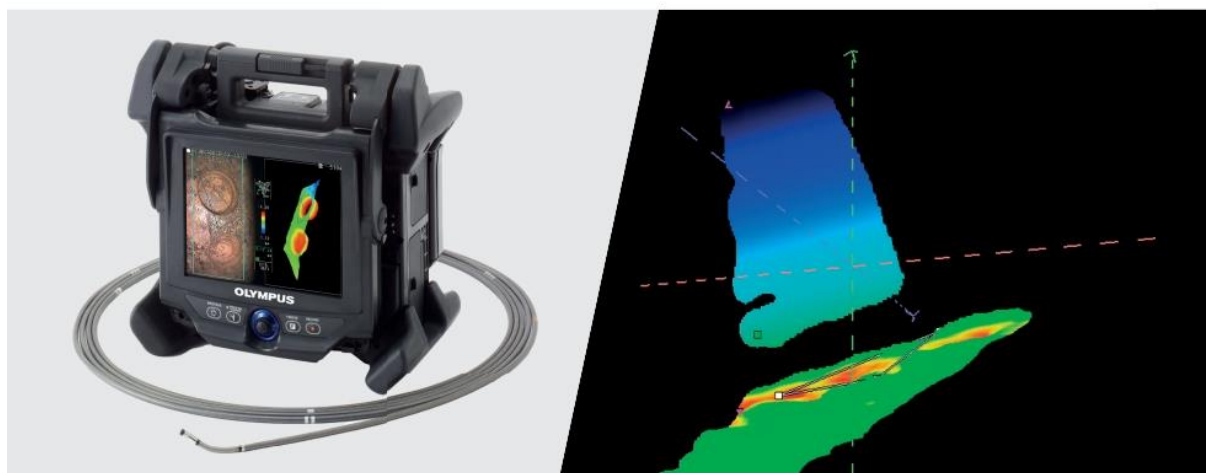
- Vydávání publikace „Průvodce systémem státní podpory výzkumu a vývoje v České republice“
- Vydávání příruček
- Vydávání elektronické publikace „Zpravodaj ČSNMT“
- Spolupořádání mezinárodních konferencí „METAL“, „NANOCON“, konferencí o struktuře materiálů a mikromechanice lomu (MSMF), „COMAT“ a česko-slovenských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

Mezinárodní spolupráce

- Federation of European Materials Societies (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



Přesné měření s 3D zobrazováním

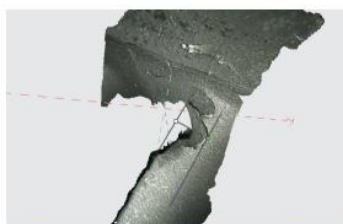
Zdokonalte své stereoskopické měření pomocí videoskopu IPLEX NX

Díky zobrazení měřených objektů ve 3D si můžete z různých úhlů vizualizovat detaily, které by u 2D obrázků nešly zobrazit. Nyní lze snáze než kdy dříve ověřit přesné umístění měřicích bodů, čímž dochází ke zvýšení spolehlivosti měření a k eliminaci nutnosti opětovného měření.



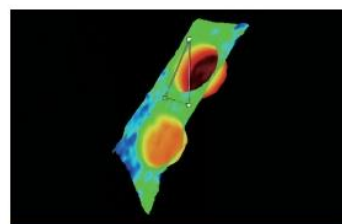
Vyšší spolehlivost měření

- 3D modelování s jasným vykreslením komplexních tvarů
- Potvrzení měřicích bodů pro rychlejší kontroly v reálném čase



Snadné nastavení referenčních čar

- 3D snímky usnadňují spolehlivé nastavení referenčních čar u obtížně zobrazitelných komponent



Pokročilé měření hloubky

- Okamžité potvrzení referenčních rovin
- Okamžité potvrzení nejvyšších a nejnižších bodů



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

Telemetrická stanice – nově bezdrátový monitoring – různé typy senzorů

DIO 3000 telemetrická 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**

STARMANS electronics, s.r.o., Praha 8, www.starmans.net, telemetry@starmans.cz



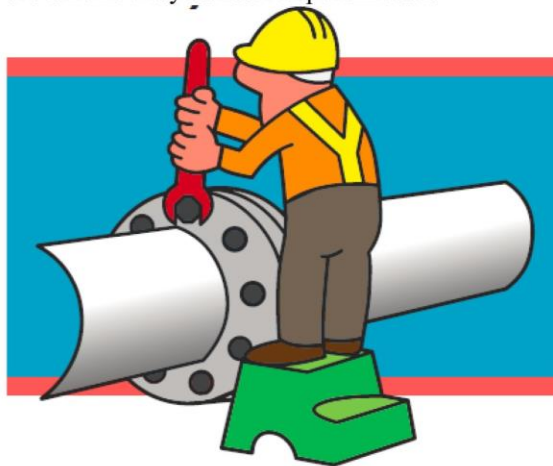
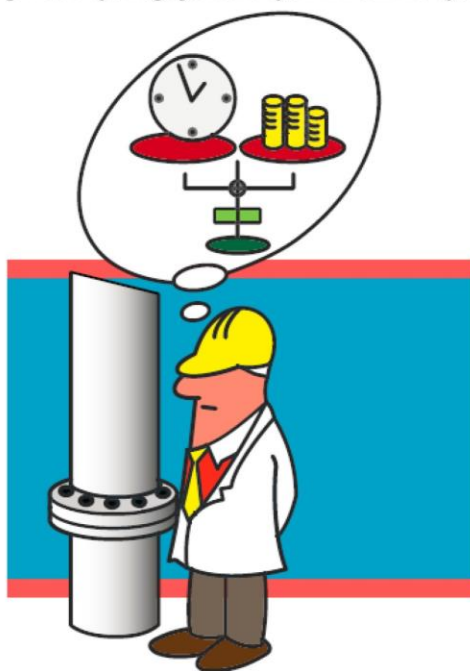
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

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.
*Ústav procesní a zpracovatelské
techniky, fakulta strojní
ČVUT Praha
Technická 4
166 07 PRAHA 6*

tel.: +420 604 443 284

Kontaktní osoby:
Ing. J. Tomáš
Technický úsek

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



- konstrukce vozidel a pohonných systémů
- modernizace výrobních strojů
- obráběcí technologie
- tvářecí technologie

Laboratoř pro virtuální prototypy
 Laboratoř technologického plánování výroby
 Laboratoř dilenské metrologie
 Laboratoř technologie obrábění
 Laboratoř experimentálního obrábění
 Laboratoř experimentálního tváření
 Metalografická laboratoř
 Mechanická zkušebna
 Zkušebna komponent dopravních prostředků
 Zkušebna provozní pevnosti a únavové životnosti
 Laboratoř strojírenských experimentálních metod



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

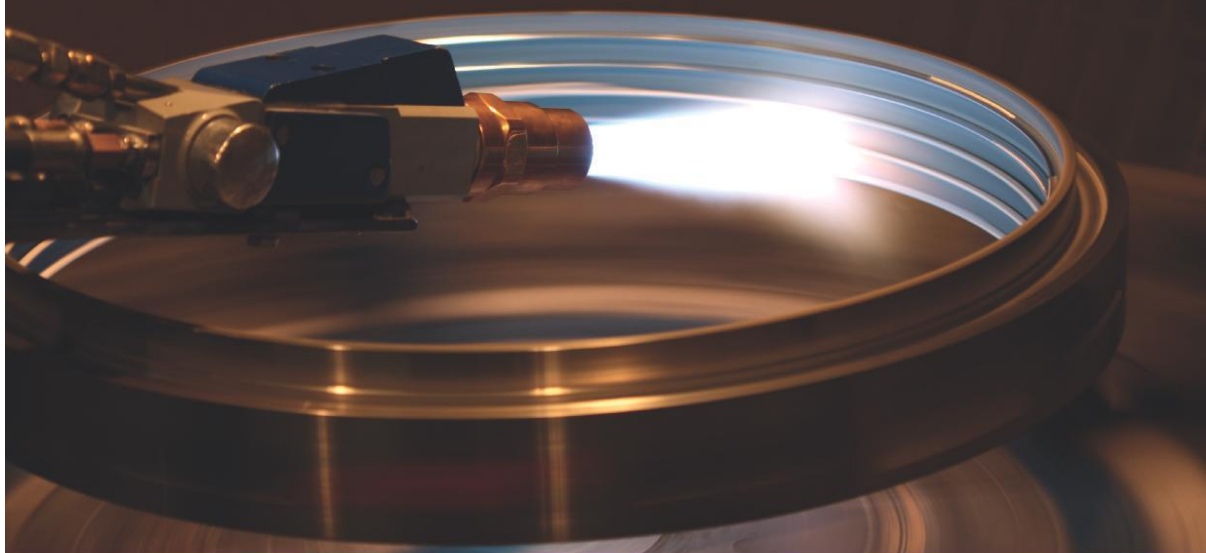
web: www.eacr.cz

Žárové nástřiky: budoucnost povrchových úprav

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

Přehled technologií VZÚ Plzeň

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



BEZPEČNOST ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ VŮČI EXTRÉMNÍM KLIMATICKÝM JEVŮM – EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA POŠKOZENÍ NÁRAZEM LETÍCÍCH TĚLES

POWER PLANT SAFETY VIS-A-VIS THE EXTREME CLIMATIC EVENTS – EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE DAMAGE DUE TO THE FLYING BODIES IMPACT

Jan Raška a Radek Doubrava

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Beranových 130, 199 05 Praha – Letňany,
e-mail: raska@vzlu.cz, tel.: +420 225 115 45

Abstrakt

Součástí bezpečnosti energetických zařízení, jako objektů kritické infrastruktury, je ochrana proti nárazu letících těles. Tato tělesa – části stromů, stavebních konstrukcí nebo letadel – mohou být vymrštěna buď v důsledku extrémních klimatických jevů (vichřice, tornádo, ...), nebo vlivem lidské činnosti (průmyslové havárie, výbuchy, pády letadel, ...).

V příspěvku jsou prezentovány experimenty nárazu těles vystřelených pneumickým dělem a snímaných vysokorychlostní kamerou. Tyto reálné experimenty jsou porovnány s experimenty virtuálními, kdy náraz těles (vysokorychlostní impakt) je simulován explicitní metodou konečných prvků. Konkrétně je prezentován náraz betonového tělesa do kompozitové konstrukce a impakty kroupou.

Abstract

The protection against the flying bodies is a part of the safety of the power plant, in terms of critical infrastructure object. This bodies – tree parts, engineering constructions, aircraft – can be shoot out due to extreme climatic events (windstorm, tornado, ...) or due to human activity (industrial disasters, explosions, aircraft crashes, ...).

This paper deals with experiments of impact bodies, catapult by the pneumatic cannon end recorded by the high-speed camera. These real experiments are compared with the virtual ones, the high-speed impact is simulated by the explicit finite element method. Concretely, the concrete body impact into the composite structure and the hail-strikes are examined.

Úvod

V důsledku extrémních klimatických jevů, nebo lidské činnosti, mohou být energetická zařízení zasažena rozměrnými objekty se značnou kinetickou energií. Analýzu účinku impaktu těchto letících těles je možné provádět numerickou simulací, vzhledem k rozměrům objektů (částí stromů, trosk stavebních konstrukcí nebo letadel) je experiment v plném měřítku většinou prakticky vyloučen.

Impakt je rychlým dynamickým dějem, který je vhodný řešit implicitní metodou konečných prvků. Pro prezentované výsledky byl použit software ABAQUS EXPLICIT.

Aby byla simulace realistická, je nutné aplikovat komplexní materiálové modely, zejména pak modely iniciace a růstu poškození. Podmínkou průkaznosti takové numerické analýzy (její shody s fyzikální realitou) je její experimentální validace v redukovaném měřítku. Pro tyto experimenty bylo ve společnosti VZLÚ použito pneumické dělo, primárně sloužící pro průkaz odolnosti letecké konstrukce při střetu s ptákem.

V tomto příspěvku je prezentován náraz betonové krychle, simulující trosky stavební konstrukce, do kompozitového materiálu a příklady impaktu kroupou.

Impakt kompozitové lopatky betonovým tělesem

Příkladem, kdy bylo nutné prokázat odolnost konstrukce energetického zařízení vůči nárazu letících těles, je kompozitová lopatka ventilátoru záložní chladicí věže elektrárny. V případě extrémního (tisíciletého) větru existuje riziko zborcení betonové konstrukce primárních chladících věží. Za těchto okolností přebírají jejich funkci záložní chladicí věže s nucenou ventilací. Existuje ovšem nebezpečí, že trosky betonové konstrukce zasáhnou a poškodí lopatky ventilátoru záložní chladicí věže. Za tímto účelem byl ventilátor chráněn ocelovou sítí. Nicméně, bylo nutno prokázat, že úlomky betonu do velikosti ok sítě neohrozí funkci ventilátoru.

Průkaz odolnosti konstrukce vůči nárazu betonových trosek byl proveden pro celou obálku rychlostí, úhlů dopadu a míst impaktu numericky, implicitní metodou konečných prvků, softwarem ABAQUS EXPLICIT. Nicméně tyto numerické simulace byly validovány experimentálně, reálným impaktem kompozitové konstrukce betonovým tělesem [1].



Obr. 1: Pneumatická děla VZLÚ s průměrem hlavní 125 mm (nahore) a 260 mm (dole)

Pneumatickým dělem (obr. 1) byla vystřelena betonová tělesa do kompozitové lopatky, instalované před ústí hlavní, jak je dokumentováno na obr. 2.



Obr. 2: Realizace zkoušky impakt betonovým tělesem

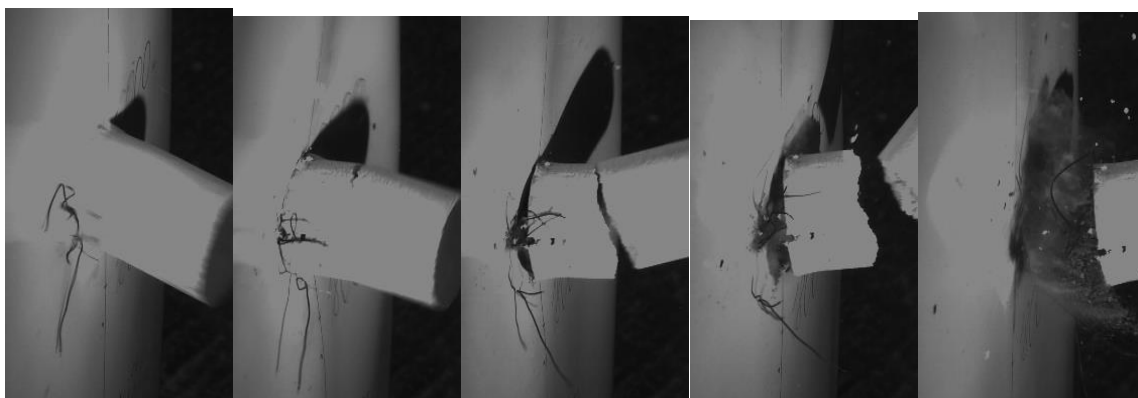
Betonová krychle o rozměrech 80 x 80 x 80 mm byla umístěna do velmi lehkého polystyrenového obalu, který slouží zároveň k utěsnění hlavě – viz obr. 3.



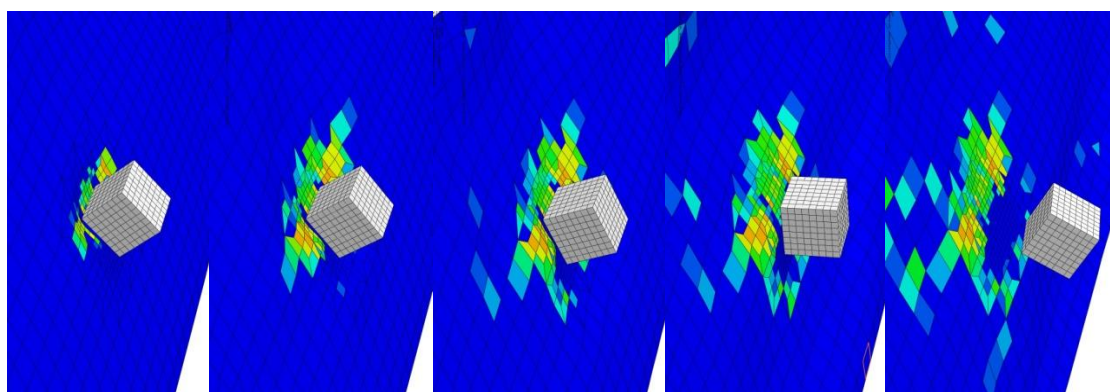
Obr. 3: Projektil: betonové těleso před a po experimentu (první impakt)

Byly realizovány dva impakty. První výstřel byl veden do osy nosníku lopatky rychlostí 194 km/h. Na sledu snímků z rychloběžné kamery (obr. 4) je dobře patrná dynamika nárazu tělesa do konstrukce, dynamické deformace kompozitního materiálu a odraz tělesa zpět. Při impaktu došlo k rozlomení polystyrenového obalu, betonové těleso ovšem zůstalo prakticky neporušené, jak je vidět na obr. 3. K poškození nedošlo ani u kompozitové konstrukce.

Tentýž děj, numericky simulovaný, je zobrazen na sledu snímků na obr. 5. Barevná škála indikuje míru zatížení kompozitního materiálu. Zobrazené hodnoty jsou relativně nízké, v žádném místě nedochází k destrukci materiálu, což je v souladu s experimentem. Stejně jako v reálném případě se betonové těleso odráží od kompozitové konstrukce.



Obr. 4: Sled záběrů rychloběžné kamery – první impakt



Obr. 5: Sled záběrů numerické simulace – první impakt

Druhý impakt byl veden mimo osu nosníku lopatky rychlostí 337 km/h. Zde došlo v trajektorii impaktu k totální destrukci přední i zadní stěny lopatky (viz obr. 6), nicméně tato destrukce spotřebovala veškerou kinetickou energii, betonové těleso se zastavilo uvízlo v dutině lopatky.



Obr. 6: Poškození přední (vlevo) a zadní stěny (vpravo) – druhý impakt

Tento děj se podařilo prakticky shodně numericky nasimulovat, což dobře validuje zejména model porušení kompozitového materiálu a použité materiálové charakteristiky.

Impakt kroupou

Velmi aktuální je nebezpečí poškození fotovoltaických elektráren dopadem krup. Tato energetická zařízení jsou relativně málo odolná vůči extrémním klimatickým jevům, jako jsou vichřice, tornáda a krupobití, které mohou způsobit vysoké ekonomické škody. Z těchto rizik má právě dopad velkých krup nejničivější účinek.

VZLÚ se analýze vysokorychlostních impaktů kroupou věnuje experimentálně od 70. let, numericky poslední desetiletí. I když se převážně řešily letecké aplikace, fyzikální podstata problému je stejná, jako v případě impaktu fotovoltaických panelů.

Standardní zkoušky se provádějí s kroupami o průměru 25 a 50 mm, vložené do polystyrenového pouzdra, viz obr. 7. Pouzdro je v tomto případě zastaveno ústřovou brzdou a do kontaktu se zkušebním tělesem se dostane pouze kroupa.

Pro numerickou simulaci explicitní variantou metody konečných prvků je nutné vytvořit model kroupy jak klasickými prvky, tak prvky SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) – obojí na obr. 7. Zásadní pro věrohodnost simulace jsou parametry modelu poškození, dezintegrace kroupy.

Jak je patrné z obr. 8 a obr. 9, existuje velmi dobrá shoda mezi experimentem a numerickou simulací jak pro kolmý, tak pro šikmý impakt.



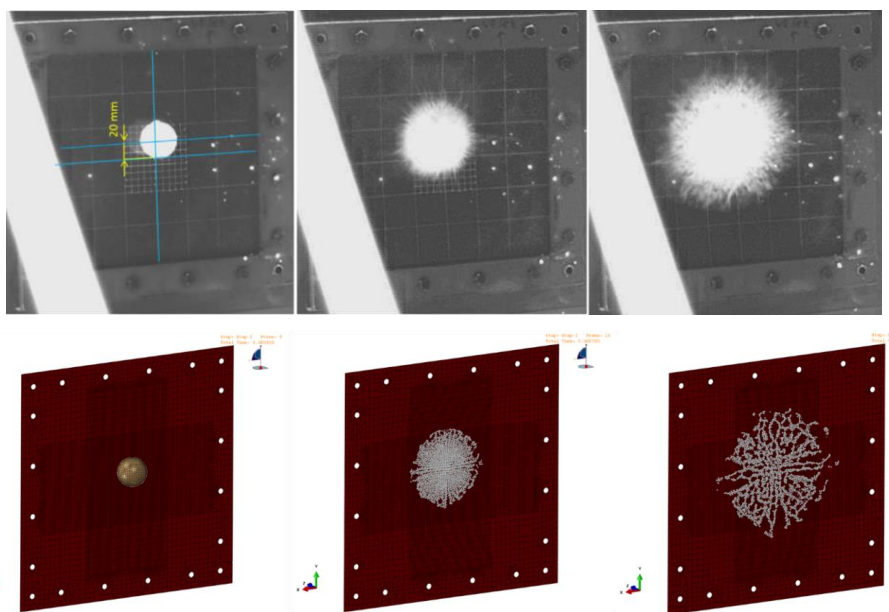
Obr. 7: Kroupa, její umístění v pouzdru, model MKP, model SHP elementy

Závěr

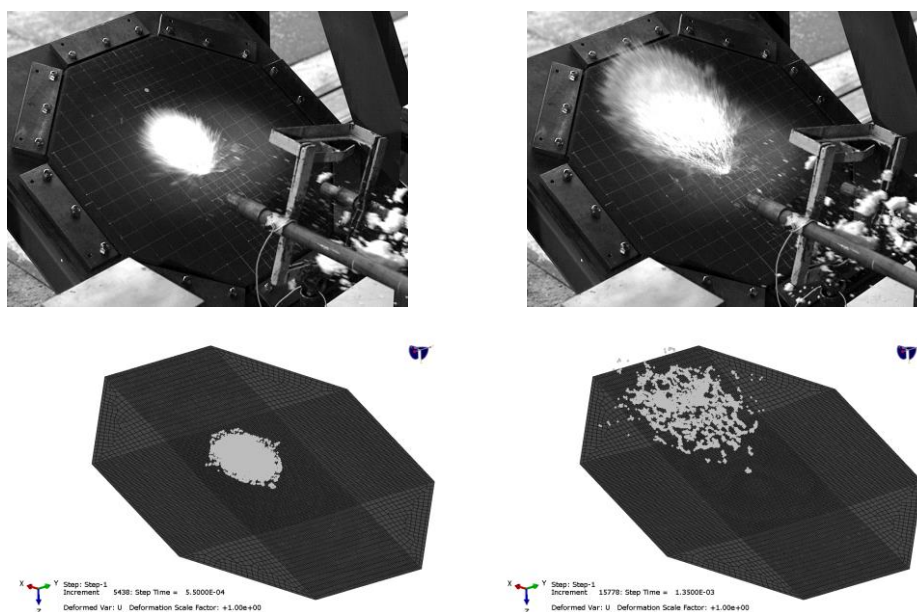
Prezentované příklady experimentální a numerické analýzy vysokorychlostního nárazu těles tvoří pouze malý výsek z problematiky bezpečnosti energetických zařízení vůči extrémním klimatickým jevům. Ukazují nicméně na možnosti řešit tyto problémy numerickými simulacemi implicitní variantou metody konečných prvků.

Tento přístup ovšem vyžaduje použití komplexních modelů a metod – zejména modelů poškození materiálu – které je ovšem nutné experimentálně validovat. Prezentovanou variantou jsou zkoušky vysokorychlostním impaktem pomocí pneumického děla.

Dlouhodobé zkušenosti s těmito zkouškami a využití získaných dat umožnilo zlepšit nastavení parametrů příslušných numerických modelů a dosahovat velmi dobré shody simulací s experimentem.



Obr. 8: Kolmý impakt: porovnání experimentu (nahore) s numerickou simulací (dole)



Obr. 9: Šikmý impakt: porovnání experimentu (nahore) s numerickou simulací (dole)

Literatura

- [1] Strnad, V. (2013): Zkouška nárazu zkušební tělesa simulujícího nádrž s leteckým palivem na pevnou překážku. Zkušební protokol, Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Praha.
- [2] Doubrava, R., Oberthor, M., Bělský, P., Vích, O. (2019): An Improvement of measurement technique for high speed impact tests analysis. Proceedings of 57th International Conference Experimental Stress Analysis, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Luhačovice, CD-ROM. ISBN 978-80-214-5753-9
- [3] Doubrava, R. (2013): *SPH Technique Application for Fast Impact Simulation*. Report, VZLU R-5841, Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Praha. Available on: <http://www.vzlu.cz/en/certified-methodology-n-met-c488.html>

PRVOTNÍ VÝSLEDKY ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ NÁSTŘIKU COLD SPRAY A SKLOLAMINÁTŮ V RÁMCI PROJEKTU NCK – POVRCHOVÉ ÚPRAVY

PRIMARY RESULTS OF ULTRASONIC TESTING OF COLD SPRAY AND FIBREGLASSES IN THE NCK PROJECT SOLVING – SURFACE TREATMENT

Jana Veselá a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Cold Spray (CS) je jednou z metod povrchových úprav kovů spadající do skupiny žárových nástřiků. V posledních 20 letech se pozornost výzkumu zaměřovala zejména na technologické aspekty výroby nástřiku zahrnující zařízení, nosné plyny, optimalizaci parametrů a monitoring nástřiku v průběhu depozice. Společně s rozvojem nové technologie nanášení materiálu na substrát byla pozornost věnována samotnému nástřiku z pohledu mechanických, korozních a únavových vlastností s využitím destruktivních zkoušek. S rostoucím počtem aplikací v oblasti vojenského, leteckého, energetického průmyslu zejména v oblasti opravárenství dochází k rozvoji nedestruktivního zkoušení kvality Cold Spray nástřiků. Cílem projektu NCK je ověřit schopnost technologie Cold Spray zajistit alternativní ochranu svarových spojů a využití v oblasti oprav geometrie komponent vodních a klasických elektráren, kdy v oblasti nedestruktivního zkoušení je hlavní pozornost věnována ověření přilnutí nástřiku k substrátu, měření tloušťky nástřiku a útlumu ultrazvuku v nástřiku jako jednoho z ukazatelů vnitřní kvality nástřiku Cold Spray.

Projekt NCK – Povrchové úpravy zahrnuje v oblasti nedestruktivního zkoušení také ultrazvukové zkoušení a měření tloušťky sklolaminátových komponent.

Abstract

Cold Spray is one of the methods of metal surface treatment in the heat spray group. In the last 20 years, the focus of research has been on the technological aspects of spray coating production, equipment, carrier gas, parameter optimization and deposition monitoring during deposition. Along with the development of a new material deposition technology, attention was paid to spraying itself in terms of mechanical, corrosion and fatigue properties using destructive tests. With a growing number of applications in the military, aerospace, power engineering and repair industries, non-destructive quality testing of Cold Spray sprays is being developed. The aim of the NCK project is to verify the ability of Cold Spray technology to provide alternative protection for welded joints and use in the repair of geometry components of water and conventional power plants, where the main focus in the field of non-destructive testing is to verify the adhesion of the spray to the substrate, to measure the spray thickness and ultrasound attenuation in the feed as one of the internal quality indicators of Cold Spray.

The NCK Project – Surface Treatment also includes ultrasonic testing and thickness measurement of fiberglass components in the field of non-destructive testing.

Úvod

Prvotní pozornost výzkumu a vývoje byla zaměřena na technologii nástřiku Cold Spray, na zařízení a samotný proces nástřiku zahrnující monitoring nástřiku, stanovení vhodných nosných plynů a materiálů určených k depozici s ohledem na požadavky dané aplikace. [1]

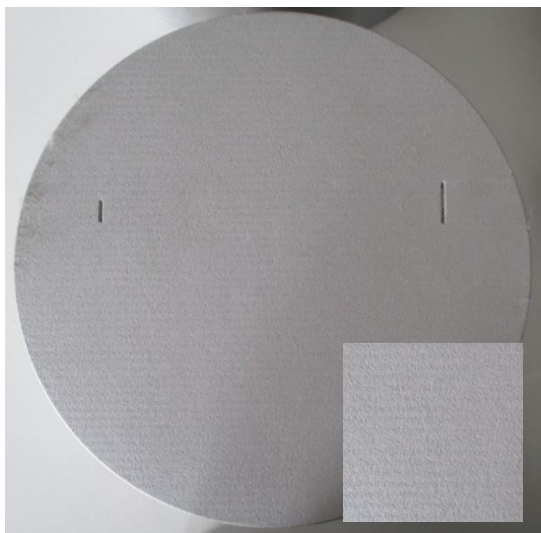
Společně s rozvojem nové technologie nanášení materiálu na substrát byla pozornost věnována samotnému nástřiku z pohledu mechanických, korozních a únavových vlastností s využitím destruktivních zkoušek. Hlavní pozornost je v posledních 10-15 letech věnována ověření přilnutí nástřiku k substrátu (adheze), přilnutí jednotlivých vrstev v samotném nástřiku (koheze), porozitě nástřiku CS, měření tloušťky nástřiku on-line, měření útlumu ultrazvuku v nástřiku. [2, 3]

Zkušební tělesa

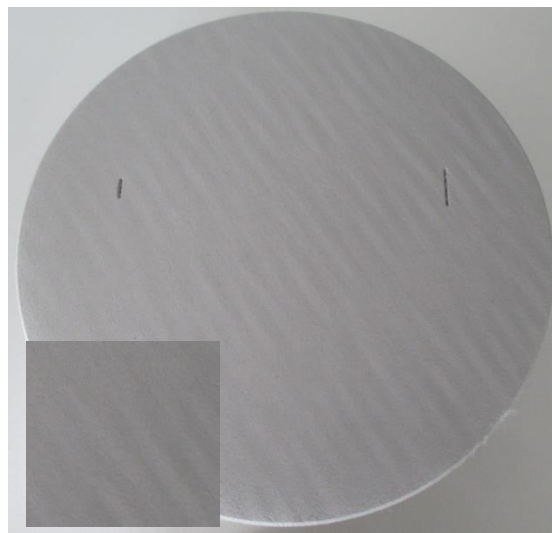
Vyrobeny dva typy zkušebních těles (ZT) s označením „penízek“ o průměru 25,4 mm, tloušťce 5 mm a „disk“ o průměrech 130 a 139 mm s tloušťkou 50 mm. Základním materiálem (ZM) zkušebních těles určených k depozici nástřiku CS jsou oceli 08CH18N10T a 22K. Byl proveden nástřik materiálu NiCr ve formě prášku v poměru 80/20 s velikostí částic 10–32 mikrometrů, případně 10–45 mikrometrů. Před aplikací nástřiku byly všechny zkušební tělesa tryskány korundem a jako nosný plyn pro nástřik byl zvolen dusík. Deponovaná tloušťka nástřiku byla 400 mikrometrů na ZT typu peníze a 700 μm na typ disk.

Disky určené k ultrazvukovému zkoušení (UT) mají na povrchu pro CS umístěny 2 EDM vruby délky 5 a 10 mm o hloubce 1 a 2 mm. Vruby slouží k ověření jejich detekovatelnosti po aplikaci nástřiku metodou UT a metalografické hodnocení zaplnění deponovaným NiCr. Na protějším povrchu byly vhodně umístěny náhradní vady typu FBH (vývrty s plochým dnem) o průměru 2 a 4 mm do hloubky 5 mm určené k ověření detekovatelnosti přes rozhraní základní materiál – nástřik CS.

Povrch nástřiku je hladký s pravidelnou vlnitostí způsobenou technologií nástřiku pomocí Lavalovy dýzy v navazujících pruzích. Srovnání povrchu dvou těles deponovaných dvěma různými nosnými plyny, obr. 1 a obr. 2.



Obr. 1: Depozice NiCr (nosný plyn dusík)



Obr. 2: Depozice NiCr (nosný plyn helium)

Zkoušení ultrazvukem

Bylo provedeno konvenčního ultrazvukové zkoušení přístrojem Epoch 600 a přímými sondami podélných i příčných vln spolu s dvojitou sondou. Povrch zkušebních těles nebyl pro UT upravován a pro vyrovnání vlnitého povrchu byla za vazební médium použita vazelína. Prvotní měření disků 4 MHz sondou prokázalo prozvučitelnost CS nástřiku a možnost zkoušení z obou stran ZT. Vývrt FBH4 lze dobře detekovat, vývrt FBH2 obtížněji, pro srovnání jsou v tab. 1 uvedeny výšky echa při daném zesílení. Srovnávací měření bylo provedeno sondou s frekvencí 2,25 MHz, známou jako CentraScan sondou.

Dvojité sonda se ukázala jako nevhodná k detekci vývrtů v discích, ale lze ji použít u malých tloušťkách ZT typu penízek. Přímou sondou příčných vln byla měřena tloušťka nástřiku s výsledky v rozsahu 700–720 mikrometrů (22K) a 640–660 mikrometrů (08CH18N10T). Metalograficky byla na tělesech typu penízek měřena průměrná tloušťka nástřiku 628 mikrometrů (22K) a 635 mikrometrů (08CH18N10T).

Tab. 1: Nástřik Cold Spray – srovnání výsledků UT pro vývrt FBH2

Sonda	Ø FBH	08CH18N10T			22K		
		hl. vývrtu	% BSH	zesílení	hl. vývrtu	% BSH	zesílení
2 MHz	2 mm	5,35	6	59	5,22	5	59
2,25 MHz		5,1	16	50	5,07	16	50
4 MHz		4,56	14	57	4,62	7	57

Sklolamináty

Sklolamináty spadají do velké skupiny kompozitních materiálů. Jsou tvořeny skleněnými vlákny (tkaninou) vytvrzenými umělou pryskyřicí (polymerem). Vyznačují se velkou pevností, odolností vůči chemikáliím i počasí, nízkou hmotností i cenou. Jako pryskyřice se používají epoxidy, termosety (polyester, vinylester) nebo termoplasty. V literatuře se také používá i anglický název *fiberglass*, nebo zkratka GRP (*Glass Reinforced Plastic*).

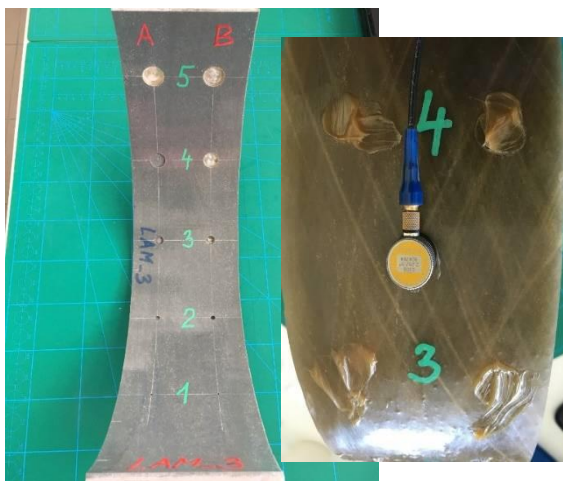
Sklolamináty jsou ve společnosti ČEZ, a. s., Klasické elektrárny používány u zařízení odsiřovacích jednotek, pro potrubní rozvody suspenze, technologické vody, kouřovody čistých spalín a nádrže technologické vody, nebo suspenze.

K provedení UT byly předány celkem 4 vzorky, z nichž 3 vzorky s označením LAM_1 až LAM_3 jsou části potrubí. Vzorek LAM_2 nemá na vnitřním povrchu chemicky odolnou vrstvu SiC, u vzorků LAM_1 a 3 je vrstva SiC na vnitřním povrchu barevně odlišitelná, zatímco u vzorku desky DER 411-45 nikoliv.

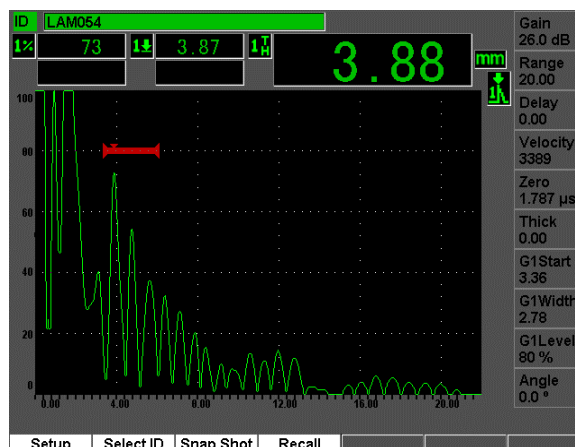
Vzorky potrubí byly axiálně rozříznuty a použity pro výrobu zkušebních těles s vývrty FBH o průměru 2, 5, 10, 16 a 20 mm ve dvou řadách do hloubky 1/3 a 2/3 tloušťky tělesa, obr. 3. Měření UT bylo provedeno impulsně-odrazovou technikou přístrojem Epoch 600 a přímými sondami se zkušebními frekvencemi 1 MHz a 2,25 MHz. Těleso typu desky DER bylo nutné zkoušet sondou o frekvenci 1 MHz z důvodu vysokého útlumu ultrazvuku.

Vnější povrch nebyl pro zkoušení upravován a nerovnosti pro dosednutí sondy byly kompenzovány vazelínou jako vazebním médiem. Vnitřní vrstva SiC nezpůsobuje významný útlum ultrazvuku, ani nebrání detekci poškození vnitřního povrchu, kde byly vývrty vyrobeny.

Pro každé jednotlivé zkušební těleso byla měřena rychlost šíření ultrazvuku podélných vln. Rychlost ultrazvuku se pohybovala v rozmezí 2235 až 3389 m/s.



Obr. 3: Zkušební těleso LAM_2 s vývrty



Obr. 4: LAM_3 – okraj FBH 16 (B4)

Sonda je schopna detekovat koncové echo (KE) pro danou tloušťku ZT, lokální narušení sklolaminátu simulované vývrty lze spolehlivě detekovat od náhradní velikosti vývrty o průměru 5 mm. Poškození sklolaminátu se projevuje poklesem KE i jeho nepřítomností. Delaminace v některé z vrstev materiálu se projevuje sledem opakovaných ech od vytvořeného rozhraní v místě delaminace a ztrátou koncového echa. Blíže lze pozorovat na vzorku LAM_3, kde na okraji vývrty FBH16 v poloze B4 došlo vlivem výroby vývrty k lokální delaminaci sklolaminátu (obr. 4).

Vývrty FBH5, 10, 16 a 20 jsou ve všech zkušebních tělesech dobře detekovatelné, zatímco vývrt FBH2 nelze se 100% jistotou detekovat.

Závěr

Prvotní výsledky ultrazvukového zkoušení nástřiků Cold Spray ukazují vhodnost metody k ověření přilnutí nástřiku k substrátu a možnost měření tloušťky nástřiku. U sklolaminátů byla ověřena prozvučitelnost a detekovatelnost umělých vad.

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

Literatura

- [1] EPRI (2018): *Extended Storage Collaboration Program Canister Mitigation and Repair Subcommittee*. Industry Progress Report, 3002013130.
- [2] Glass, S.W., Larche, M.R., Prowant, M.S., Suter, J.D., Lareau, J.P., Jiang, X., Ross, K.A. (2018): *Cold spray NDE for porosity and other process anomalies*. AIP Conference Proceedings 1949, paper 020010. ISBN 978-0-7354-1644-4
- [3] Chakrapani, S.K., Dayal, V. (2019): *Destructive and Nondestructive Evaluation of Dry Spots in Thick Glass Fiber Reinforced Composites*. Applied Composite Materials, Vol. 26, No. 2, pp. 693-708. ISSN 0929-189X

VÝVOJ A VLASTNOSTI TERMÁLNÍCH METALICKÝCH NÁSTŘIKŮ K PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT SPALOVEN, TEPLÁREN A ENERGETICKÝCH CELKŮ

DEVELOPMENT AND CHARACTERISTICS OF THERMAL METALLIC SPRAYS TO EXTEND THE LIFE OF THE COMPONENTS OF COMBUSTION PLANTS, HEATING PLANTS AND ENERGY UNITS

Jiří Janovec, Jakub Horváth a Michal Junek

Ústav materiálového inženýrství, Strojní fakulta ČVUT v Praze

Abstrakt

V příštích deseti letech musí Česká republika provést zásadní změny v oblasti nakládání s odpady, dodávek tepla a výroby elektřiny. Emisní povolenky i očekávaná uhlíková daň, vyplývající z členství České republiky v EU nutí tlumení skládek a spalování hnědého uhlí. Značná část zařízení, která splňují zákonné limity nebo výjimky z nich, je na konci své technické životnosti. Prodloužení životnosti termálními nástřiky je ekonomicky výhodnou variantou.

Příspěvek se zabývá vývojem optimálního složení nástřikového materiálu při použití osvědčené technologie vysokorychlostních nástřiků MetalSpray (HVTS), která zajišťuje ochranu spalovacích komor a povrchů pro výměnu tepla spaloven komunálního odpadu a tepláren. Cílem je snaha snížit náklady nástřikování, to vede k modifikaci chemického složení nástřikových povlaků snižováním obsahu drahých legur.

Abstract

In the next ten years, the Czech Republic must make major changes in waste management, heat supply and electricity generation. Emission allowances as well as the expected carbon tax resulting from the Czech Republic's membership in the EU force the control of landfills and the burning of brown coal. Much of the equipment that meets the legal limits or exceptions is at the end of its technical life. Extending the lifetime of thermal spraying is an economically advantageous option.

The paper deals with the development of optimal composition of the spraying material using the proven high-speed spraying technology MetalSpray (HVTS), which provides protection of combustion chambers and surfaces for heat exchange of municipal waste incineration plants and heating plants. The aim is to reduce the cost of spraying, which leads to modification of the chemical composition of the spray coatings by reducing the content of expensive alloys.

Úvod

V roce 2017 jsem prezentoval [1] výsledky porovnání kvality 7 žárových nástřiků v laboratorních EPRI (Electric Power Research Institute, USA). Byly porovnány NiCr nástřiky firem IGS (Integrated Global Services) nástřiky firem AMSTAR. Hodnoceny byly korozní úbytky a mikrostrukturální změny na kotelních membránových stěnách po 38 000 hodinách provozu v uhelné elektrárně Duke Energy [1].

Ke korozním úbytkům dochází v místech, kde se vyskytují z paliva prvky síra, sodík, vanad a draslík. Jejich okysličováním při splování vzniklé oxidy se usazují na povrchu trubek a vznikají působením SO_2 pyrosulfidy $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ a $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ [2]. Tyto eutektické soli mají nízké teploty tání (pod 427°C), u vanadových sloučenin kolem 537°C . U popelových či struskových nánosů je dosažení těchto teplot možné za probíhající intenzivní koroze.

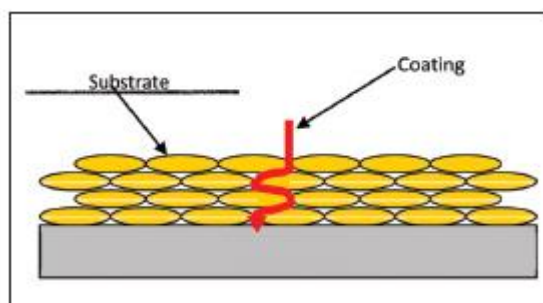
V prostředí spaloven dochází dále vlivem chloridových sloučenin k tvorbě agresivnějšího FeCl_3 . Nově byl vyvinut žárový NiCrMoW. Ten především díky vyššímu obsahu Mo má vý-

razně vyšší ekvivalent PRE odolnosti pittingové – bodové korozi proti Cl aniontům. Legující prvky jako jsou uvedené Mo, W a případně Ti nemohou tvořit pasivační filmy typu Cr_2O_3 . Tyto prvky vytváří především intermetalické fáze, či karbidy, vedoucí ke zvýšení žáropevnosti a erozivní odolnosti povlaků.

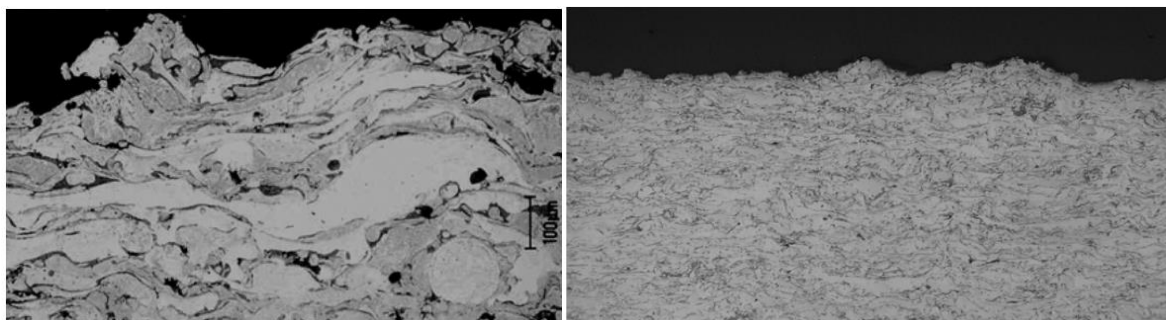
Podstata bariérového mechanismu nástřiků

Kvalitu povlakového nástřiku určuje jeho odolnost proti prostupování koroze, tj. schopnost vytvoření kompaktních pasivačních bariér a tím zabránění koroznímu rozpouštění povlaku a ocelového podkladu oxidací, redukcí a sulfatací.

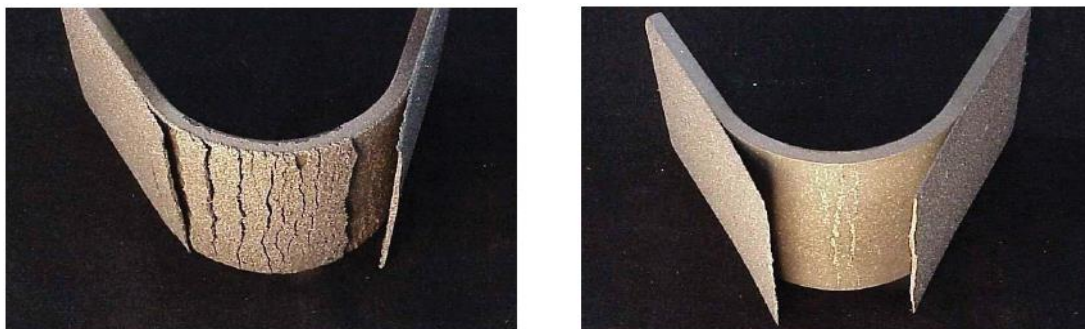
Obr. 1 ukazuje schéma propustnosti povlaků. Odolnost proti pronikání koroze záleží především na označené cestě průniku rozhraními částic povlaku. S délkou cesty odolnost proti korozi stoupá.



Obr. 1: Schéma propustnosti povlaků



Obr. 2: Nástřik materiálem IGS 5-450 [2]: a) malé rychlosti rozprašovacího vzduchu, b) velké rychlosti rozprašovacího vzduchu



Obr. 3: Ohybová zkouška kompaktního a křehkého nástřiku [3]

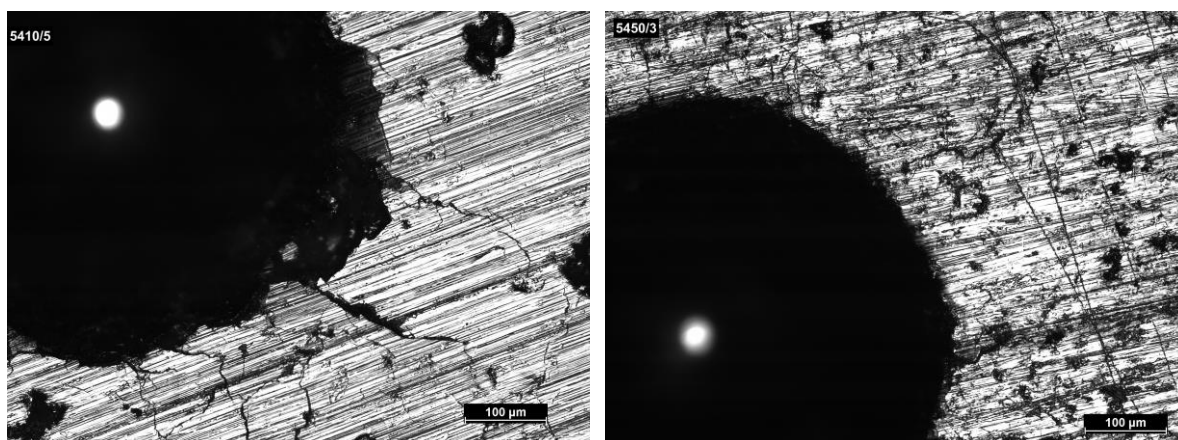
Lepším řešením ke zvýšení délky cesty korozních zplodin, než je nárůst tloušťky povlaku, je zjemnění mikrostruktury povlaku. Ztenčování či postupné odlupování povlaku je jen zřídka důvodem selhání bariérové ochrany povlaku. Většina selhání povlaků tkví v korozi podkladové oceli.

Obr. 2 ukazuje zjemnění nástríkového povlaku použitím sonické trysky, když vysoká rychlost rozprašovacího vzduchu vede ke zvýšení úrovně atomizace a tím i ke zjemnění mikrostruktury.

Velmi jednoduchou zkouškou kompaktnosti a jemnozrnosti nástríkového povlaku je zkouška ohybem, dokumentovaná na obr. 3.

Firma Stoodly AN ESAB Brand dokumentuje [3] výsledky ohybové zkoušky na 150° ohybu nástríku TermaSpray 1334 tloušťky 0,050 inch (1,25 mm) naneseného na ocelovou desku tloušťky 4,8 mm.

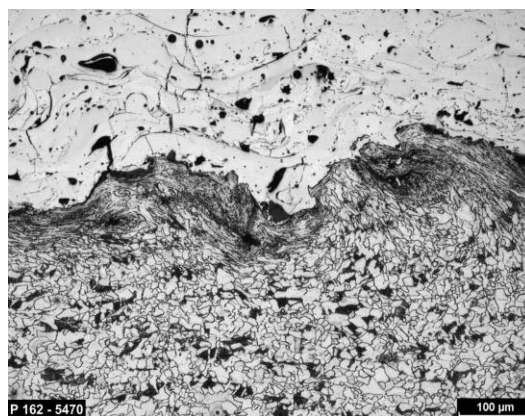
Citlivější zkušební metodou, hodnotící náchylnost žárového nástríku k praskavosti mezičásticového rozhraní je zkouška Martensovy tvrdosti či Mercedes Test. Ty jsou definovány pro Vickersovu, Berkovichovu, a nebo Rockvellou geometrii indentoru v návaznosti na původní univerzální zkoušky tvrdosti [4] a na Rockwellovu zkoušku při předtížení 98,1 N s dotížením na 1471N [5] (dle ČSN EN ISO 6508-1). Umožňují i kvantifikovat množství vzniklých mikrotrhlinek, jak je zřejmé z obr. 4 [6].



Obr. 4: Výsledky Mercedes testu: a) hrubozrnější nástrík IGS 5410, b) jemnozrný nástrík IGS 5450

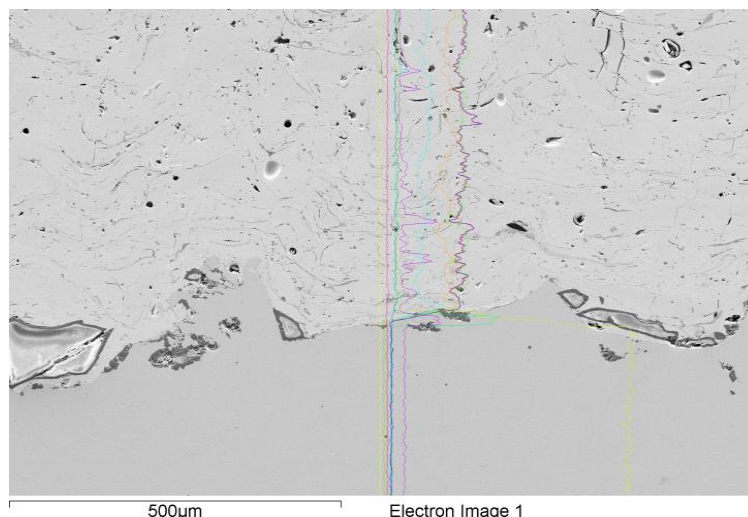
Metalurgické faktory odolnosti nástríků

Mezičásticové povrchy NiCr nástríků jsou tvořeny ochrannými filmy oxidu chromitého. Tyto se tvoří oxidačním procesem při nástríku a vytváří účinnou pasivační bariéru proti sulfidaci niklu. V prostředí silné korozní agresivity by obsahy Cr neměly klesnout pod 30 %. Z hlediska PRE (pitting resistance equivalent) výrazně zvyšuje korozní odolnost Cl aniontům dále Mo. Oba tyto prvky však jako feritotvorné a karbidotvorné snižují plasticitu nástríků, což musí být eliminováno niklem. Tím bohužel nástríky patří mezi drahé superslitiny.



Obr. 5: Rozhraní nástríku a nízkolegované oceli

Mechanismus vzniku přilnavosti k základnímu materiálu, tj. kvalitu adheze nástřiku k podkladu určuje krystalizačně mechanický proces. Dochází k lokálnímu natavení povrchu mikroobjemů podkladové oceli a při následné solidifikaci – tunutí, vlivem rozdílných hodnot součinitelů tepelné roztažnosti mezi nástřikem a uhlíkovou ocelí i k plastické deformaci povrchu méně pevné oceli. Plastizaci povrchu podkladu ovlivňuje i předchozí korundové otryskávání – viz obr. 5. U obou druhů nástřiků se objevují v oblasti adhezního spoje částicové či plenovité lamelární oxidy, později identifikované metodou EDS jako oxidy hliníku a křemíku.



Obr. 6: Průběh chemického složení nástřikem

Mikrochemickou liniíovou analýzou byla proměřena koncentrace prvků od vnějšího povrchu nástřiku přes rozhraní do základního materiálu. Linie byla vedena buď přes homogenní rozhraní nebo přes vyloučenou částici na rozhraní. Analyzovány byly prvky Mo, Cr, Fe, Ni, Al, Si, P, S, O a C. Na rozhraní mezi nástřikem a podkladovou ocelí je zřejmý výskyt oxidických blán či částic, oxidů Al a Si. V případě větších oblých částic jde především o oxidy hliníku, u drobnějších podélných částic o oxidy křemíku. Jde o produkty oxidace základní oceli v procesu nástřiku, patrně i důsledek korundového otryskávání. Nahodilost průběhu uhlíku, i přes nepřesnost měření jeho koncentrace, souvisí s možností tvorby cementitu při solidifikačním procesu na rozhraní, či tvorby karbidů během nástřiku.

Závěr

Vývoj ekonomicky přijatelnějších NiCr nebo NiCrMoWTi nástřiků musí respektovat popsané fyzikální a metalurgické mechanismy pasivačních bariér proti korozi podkladové nízkouhlíkové oceli.

Při aplikaci dvouhořákových nástřiků lze pro korozně méně agresivní prostředí použít jako druhé i trubičkové dráty Hastelloy C 276 či nízkolegované oceli. Nabízený sortiment přídatných trubičkových drátů například pro navařování žárovevných korozně, abrazivně či erozivně odolných ocelí je bohatý. Proto lze volit řadu mixových alternativ tak, aby exponované vzorky po vyhodnocení popsanými experimentálními metodami umožnily optimalizaci navrhovaného přídatného drátu.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl jako součást Projektu TAČR TH04020487 „Vývoj a ověření sonického termálního metalického nástřiku k prodloužení životnosti komponent spaloven, tepláren a energetických celků za jejich plánovanou životnost“.

Literatura

- [1] Janovec, J., Horváth, J., Junek, M. (2017): Zvyšování životnosti uhelných elektráren a spaloven užitím NiCr žárových nástřiků. *Sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní. ISBN 978-80-261-0741-5
- [2] Hall, I., Spálenka, D. (2016): *NiCr povlaky na nižších úrovních spalovací komory (agresivní prostředí síry a vanadu)*. All for Power, pp. 54-57. ISSN 1802-8535
- [3] ESAB (2015): *Stoody ThermaSpray 1334 Safety Data Sheet*. ESAB.
- [4] DIN (1997): *DIN 50359, Universal Hardness Testing of Metallic Materials – Test Method*. DIN.
- [5] ČNI (2015): *ČSN EN ISO 6508-1: Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella*. Český normalizační institut, Praha.
- [6] Janovec, J., Junek, M., Horváth, J. (2017): *Kvalita nástřikové vrstvy IGS a její použití na energetických jednotkách*. Presentace na konferenci Energetika 2017, Řež.

NAPREDOVANIE V NDT METÓDACH ET A PAUT

THE PROGRESS IN THE NDT METHODS ET AND PAUT

Daniel Dopjera a Zdeněk Brláš

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

Abstrakt

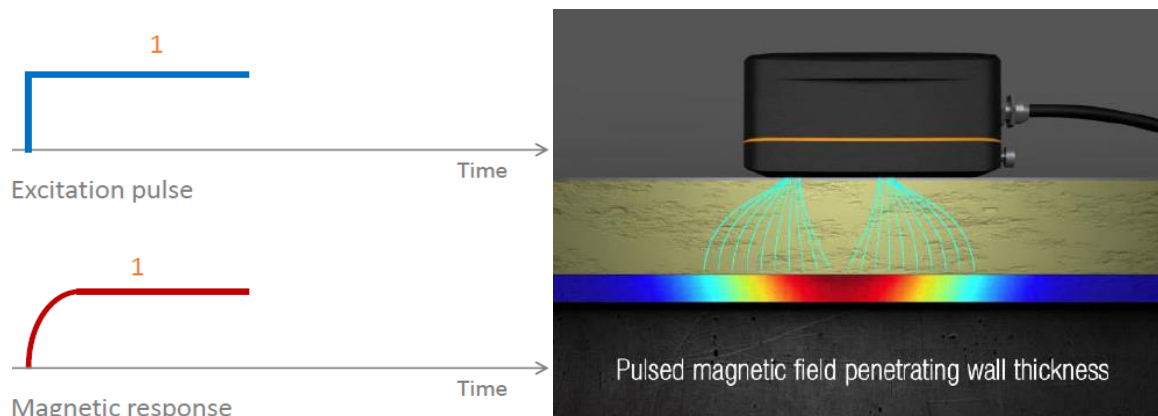
Pri prevádzke zariadení z uhlíkovej ocele (potrubí, tlakových nádob apod.) dochádza k ich poškodeniu vplyvom korózie. Na kontrolu sa prevažne používa metóda UTT (meranie hrúbky ultrazvukom), ktorá vyžaduje prístup k povrchu zariadenia. Ak je zariadenie obalené vrstvou izolácie, tak tá sa musí pred meraním odstrániť. Pulzné vírivé prúdy umožňujú tzv. mapovanie korózie aj cez vrstvu izolácie. Tak isto nastal pokrok v metóde Phased Array. Nové výkonné ultrazvukové defektoskopy otvárajú nové možnosti, ktorými sú tzv. FMC a TFM. Tieto NDT metódy ponúkajú novú efektívnejšiu kontrolu v mnohých oblastiach priemyslu.

Abstract

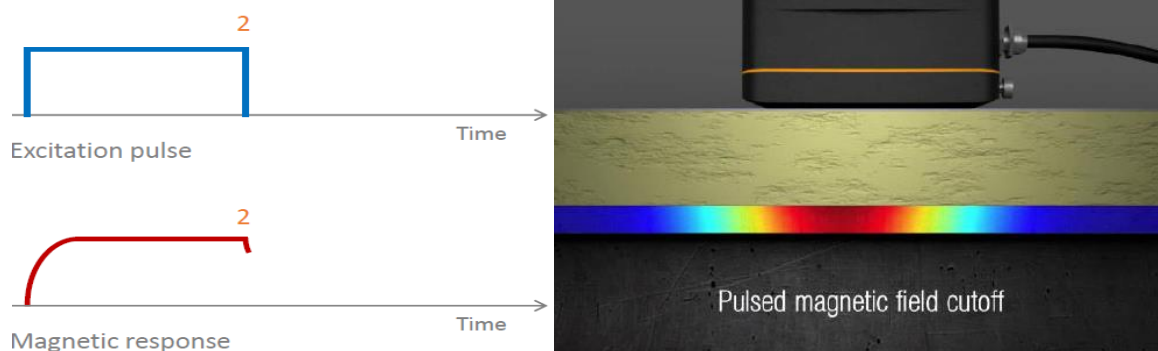
The carbon steel devices (pipes, pressure vessels, etc.) can be damaged by corrosion during operation. The UTT (ultrasonic thickness measurement) method, which requires access to the surface of the device, is predominantly used for testing. If the device is covered with an insulation layer, it must be removed before measuring. Corrosion can be mapping without removed insulation layer by pulsed eddy current testing. There is also progress in phased array testing. New powerful ultrasonic flaw detectors open up new possibilities as full matrix capture and total focusing method. These NDT methods offer new effective control in many areas of industry.

Metóda pulzných vírivých prúdov (PEC)

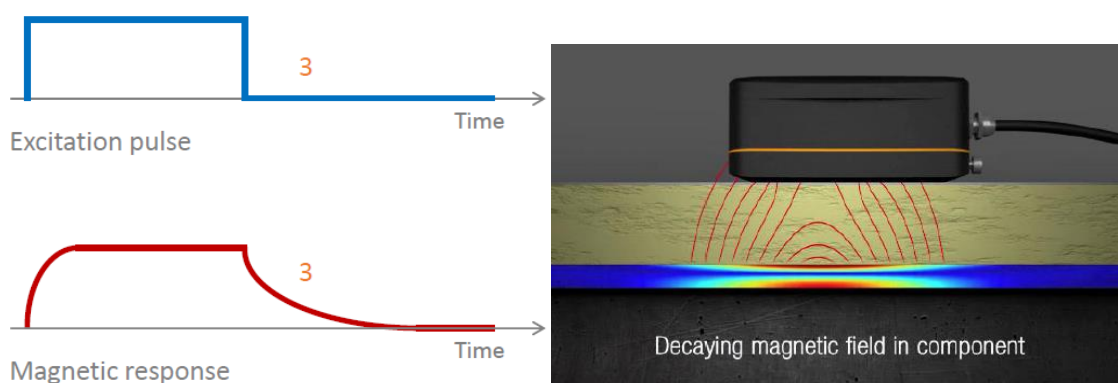
Metóda PEC spočíva vo využití fyzikálneho princípu pulzných vírivých prúdov. Tie umožňujú nasýtenie materiálu sekundárnym magnetickým poľom, resp. vírivými prúdmi aj cez hrubú vrstvu nevodivej izolácie s prípadným oplechovaním. V prvej fáze sonda vyšle elektromagnetický pulz, ktorý nasýti materiál sekundárnym magnetickým poľom, resp. vírivými prúdmi (obr. 1). V druhej fáze je elektromagnetický pulz prerušený a sekundárne magnetické pole sa v materiáli stabilizuje (obr. 2). V tretej fáze sonda sníma čas rozpadu sekundárneho magnetického poľa v materiáli (obr. 3).



Obr. 1: Prvá fáza meracieho cyklu



Obr. 2: Druhá fáza meracieho cyklu

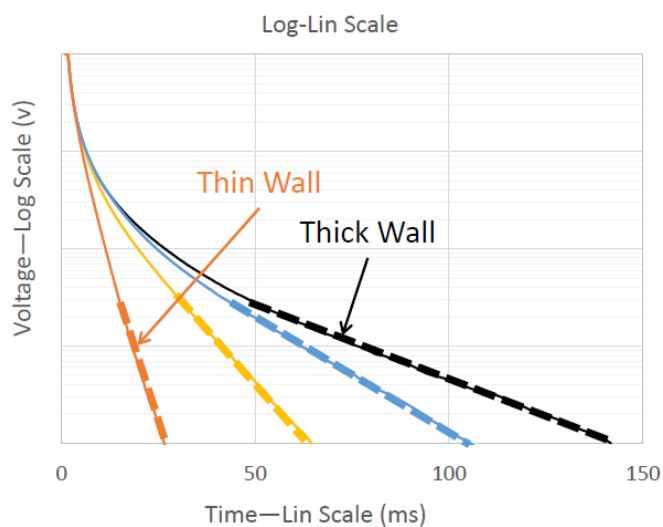


Obr. 3: Tretia fáza meracieho cyklu

Čím je materiál hrubší, tým je čas rozpadu sekundárneho magnetického poľa dlhší. Avšak čas rozpadu závisí nie len od hrúbky materiálu, ale aj od jeho konduktivity a permeability.

Analýza signálu

Tzv. A-Scan zobrazuje amplitúdu signálu v závislosti od času rozpadu sekundárneho magnetického poľa (obr. 4).

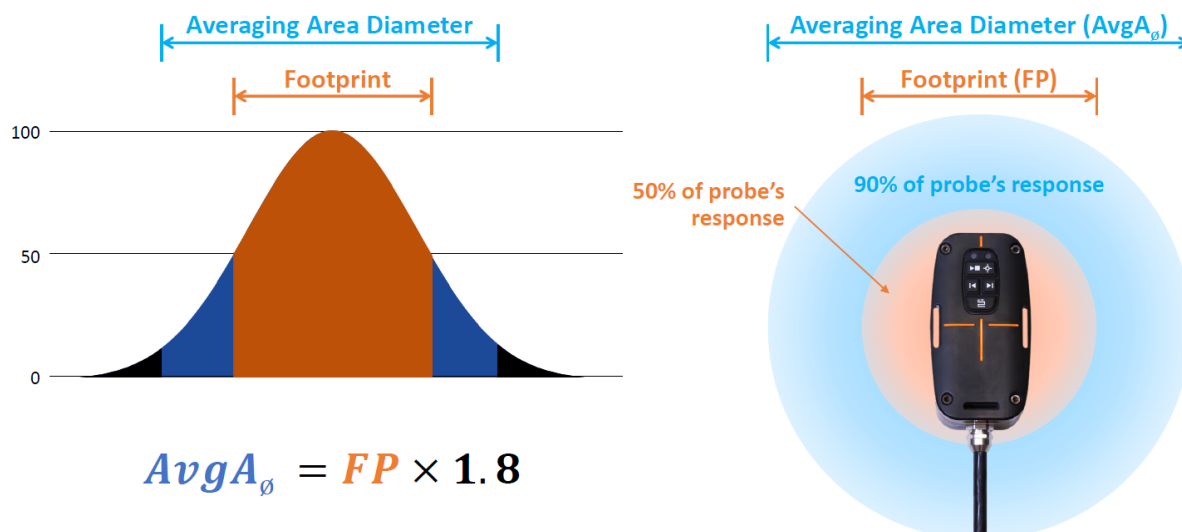


Obr. 4: A-Scan

Zmena hrúbky nevodivej izolácie s oplechovaním je v podstate zmena oddialenia sondy, tzv. lift-off. Táto zmena má vplyv na amplitúdu signálu, ale nemá vplyv na jeho priebeh, resp. nemá vplyv na tvar krivky. Veľké zmeny v oddialení sondy (veľké deformácie izolácie, oplechovania a pod.) môžu viesť ku saturácii signálu, prípadne môže byť signál príliš zoslabený. V takýchto prípadoch je nutná nová kalibrácia pre danú oblasť, čo predlžuje samotné meranie.

Sondy

Sondy definuje tzv. footprint, ktorý je definovaný ako polovica maximálnej odozvy danej sondy (pokles signálu o -6 dB). Maximálna odozva je v strede magnetického elementu sondy, ktorá klesá po tzv. zvonovitej krivke (obr. 5).

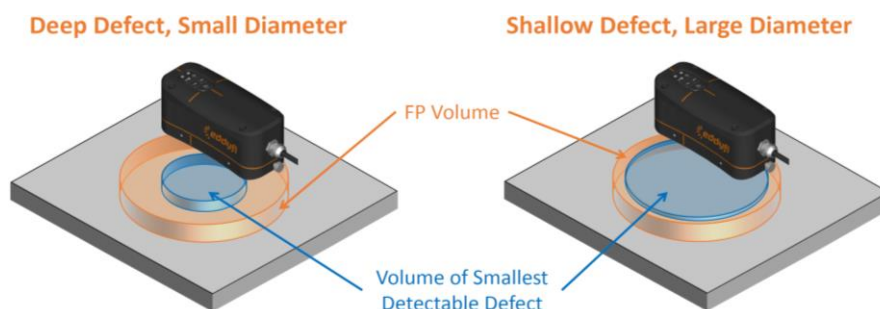


Obr. 5: Footprint

Veľkosť magnetického elementu sondy, hrúbka nevodivej izolácie, hrúbka a materiál oplechovania ovplyvňujú výsledný footprint

$$FP \approx (0,65 \cdot LO) + FP_0, \quad (1)$$

kde FP je výsledný footprint sondy [mm], LO je oddialenie sondy (hrúbka nevodivej izolácie) [mm] a FP_0 je footprint sondy pri nulovom oddialení sondy zadaný výrobcom [mm].

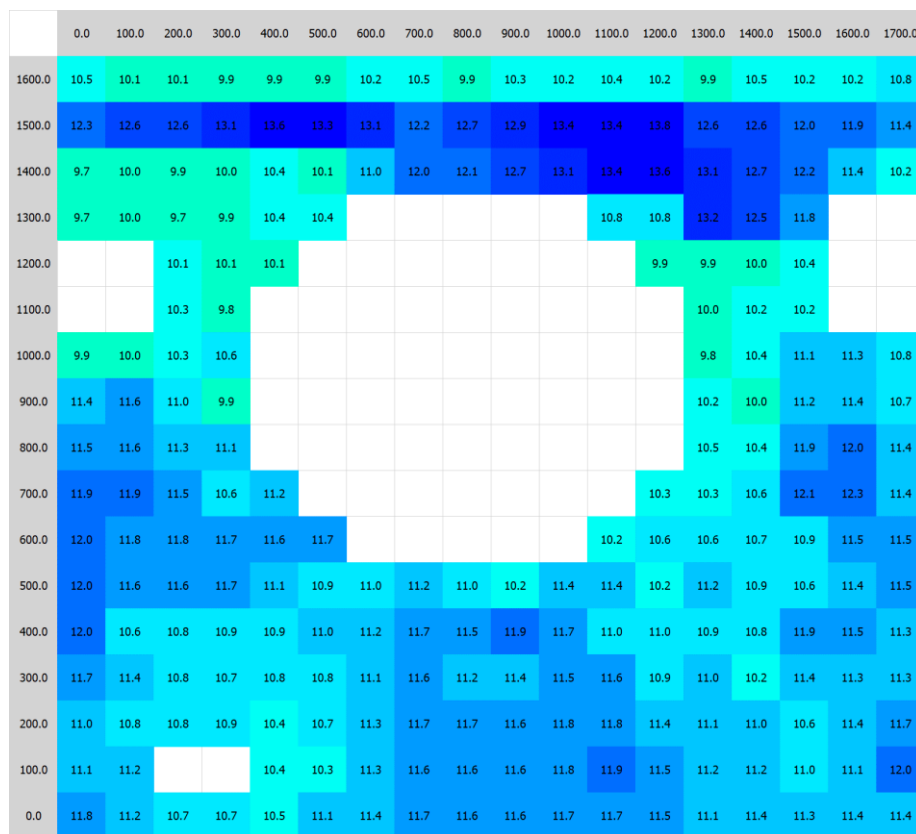


Obr. 6: Najmenší detekovateľný úbytok materiálu

Najmenší detekovateľný úbytok materiálu je približne 15% objemu footprintu danej sondy (obr. 6). Táto metóda nie je určená na hľadanie chýb typu trhlín, pórov a úzko lokalizovaného úbytku materiálu.

Meranie

Pre pokrytie 100 % objemu kontrolovanej oblasti je nutné zvoliť raster, ktorého veľkosť bude max. jeden násobok footprintu sondy. Samozrejme voľba rastru je voliteľná, ale s hustejším rastrom narastá aj čas samotnej kontroly. Na obr. 7 je príklad nameraných dát. Ide o zobrazenie C-Scan, ktorý je tvorený jednotlivými zobrazeniami A-Scan.

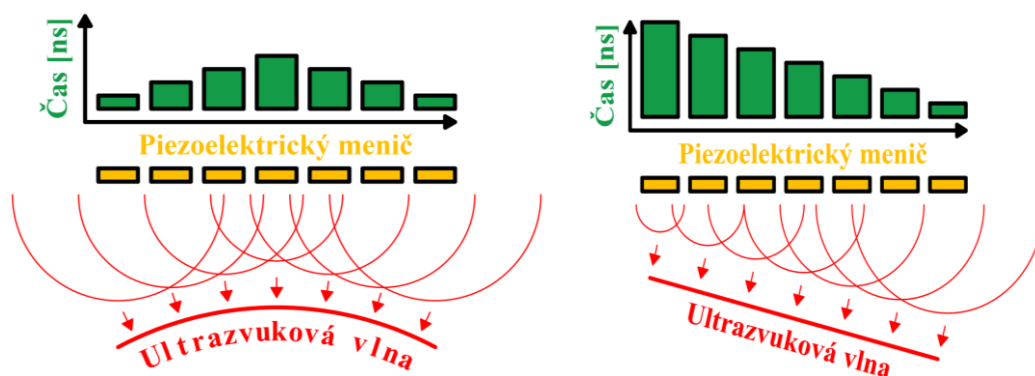


Obr. 7: C-Scan

Meranie je možné vykonať po zvolenom rastru, alebo po líniách s pripojením enkodéru. Dáta je možné exportovať do formátu .xlsx (Excel).

Nové možnosti Phased Array

Pri bežnej kontrole Phased Array ultrazvukový prístroj využíva viacero na sebe nezávislých ultrazvukových kanálov, ktoré prijímajú a vysielajú signály. Tieto signály sú riadené tzv. ohniskovým zákonom pomocou multiplexeru, ktorým môžeme riadiť výsledný ultrazvukový zväzok (obr. 8).

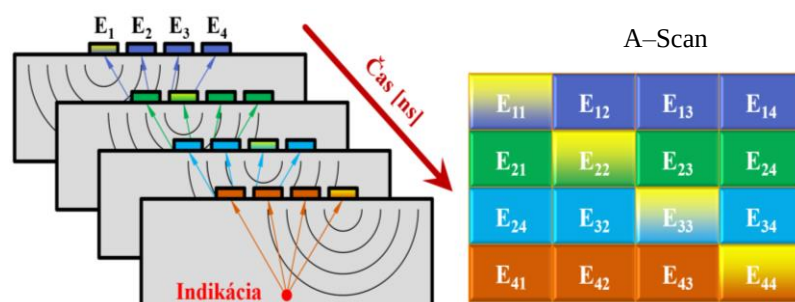


Obr. 8: Riadenie UT zväzku

Výsledkom je digitalizovaný záznam jednotlivých zobrazení A-Scan, resp. nie sú ukladané surové raw dáta.

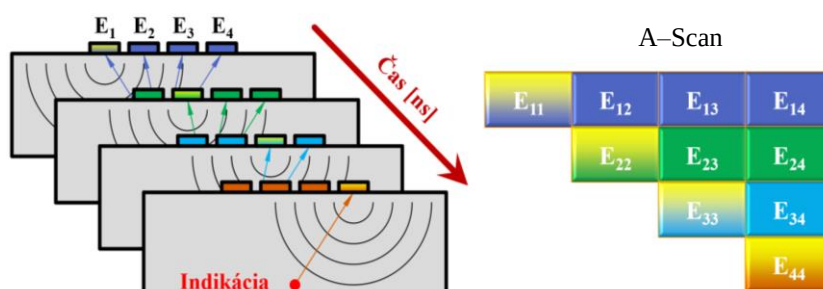
Metóda FMC a HFM

Nové možnosti ponúka metóda tzv. Full Matrix Capture (obr. 9). Prístroj zaznamenáva A-Scan signál z každého páru elementov vysielateľ-prijímač danej Phased Array sondy. Signály sú uložené už vo formáte raw. To znamená, že je možné generovať zobrazenie pre akúkoľvek veľkosť apertúry, akýkoľvek uhol ultrazvukového zväzku a akúkoľvek hĺbku fokusácie.



Obr. 9: Full Matrix Capture (FMC)

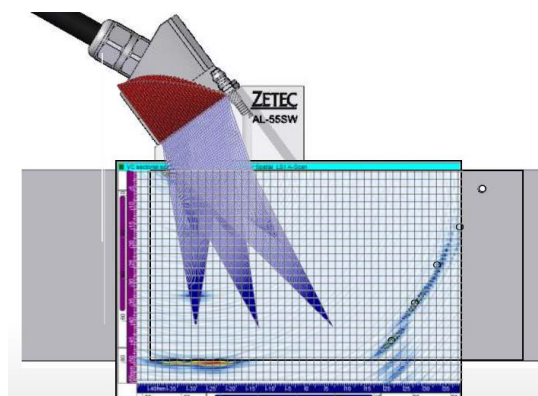
Pri použití ultrazvukovej sondy Phased Array s počtom elementov E_n dostávame až n^2 nameraných signálov. Pre zredukovanie nameraných dát možno použiť metódu tzv. Half Matrix Capture (obr. 10). Pri tejto metóde sa spracúvajú už iba cca polovica nameraných signálov.



Obr. 10: Half Matrix Capture (HMC)

Metóda TFM

Signály sú následne spracované metódou tzv. Total Focusing Method. Pre každý pixel v danom zobrazení TFM je generovaný ohniskový zákon. To znamená, že pre každý pixel v danom zobrazení je fokusovaný ultrazvukový zväzok (obr. 11).



Obr. 11: Total Focusing Method (TFM)

Nevýhodou tejto metódy môže byť nižšia rýchlosť skenovania a fakt, že TFM neponúka dáta zo zobrazenia A-Scan, čo môže byť problémom pri charakterizácii a kvalifikácii indikácie.

Záver

Metóda PEC umožňuje nový prístup ku koróznemu mapovaniu. V porovnaní s metódou UTT, nie je nutné odstraňovať nevodivú izoláciu s oplechovaním, ani nie je nutné špeciálne upravovať kontaktný povrch. Metóda je zatiaľ obmedzená na uhlíkovú oceľ. Limitná teplota uhlíkovej ocele počas kontroly metódou PEC je Curieho teplota, kedy stráca feromagnetické vlastnosti. Pri použití sond od spoločnosti Eddyfi je limitná teplota kontaktného povrchu 70 °C a pri použití predsádky môže byť až 120 °C. V súčasnosti je v platnosti jediná norma ČSN ISO 20669, ktorá sa zaoberá kontrolou metódou PEC. V tejto norme sú však iba stručné informácie a operátorovi v praxi moc nepomôžu. Metóda PEC je špecifická a nemá také veľké zastúpenie ako ostatné NDT metódy, no napriek tomu norma iba odporúča kvalifikáciu operátora podľa normy ISO 9712.

Metóda FMC/HFM s použitím TFM otvára nové možnosti pri inšpekcii sondami Phased Array. Nevýhodou je obstarávacia cena prístroja, ktorý zvládne danú techniku a fakt, že zatiaľ žiadne európske normy neuvažujú s touto technikou a už vôbec nekladú nároky na kvalifikáciu personálu, čo je problémom aj pri technike Phased Array. Týmto problémom sa už konečne začína zaoberať ASME 2019, sekcia V, článok 4, príloha XI.

Literatúra

- [1] ČNI (2018): *Norma ČSN ISO 20669. Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení feromagnetických kovových součástí pulzními vířivými proudy*. Český normalizační institut, Praha.
- [2] Eddyfi (2018): Lyft. [online]. 2018, [cit. 2019-08-14]. Dostupné na internete: <<https://www.eddyfi.com/lyft/>>
- [3] Eddyfi (2018): Probes. [online]. 2018, cit. 2019-08-14]. Dostupné na internete: <<http://www.ndt24.pl/wp-content/uploads/2016/10/lyft-pec-footprints-2.pdf>>
- [4] Eddyfi (2018): PEC. [online]. 2018, [cit. 2019-08-14]. Dostupné na internete: <<https://www.eddyfi.com/wp-content/uploads/2017/12/lyft-presentation.pdf>>
- [5] Zetec (2019): FMC and TFM. [online]. 2019, [cit. 2019-08-14]. Dostupné na internete: <<https://www.slideshare.net/ZetecNDT/overview-principles-of-full-matrix-capture-fmc-and-total-focusing-method-tfm-in-ultrasonic-inspections>>

SLEDOVÁNÍ PROVOZNÍHO STAVU ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ DIAGNOSTICKOU METODOU MCSA

CONDITION MONITORING OF ASYNCHRONOUS MOTORS USING THE MCSA METHOD

Oto Mareček, Miloš Kaška a Jiří Švestka

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

Abstrakt

Většina čerpadel, ventilátorů a kompresorů ve vlastní spotřebě jaderných i klasických elektráren je v současnosti poháněna asynchronními motory. Na tato zařízení jsou kladeny vysoké nároky především z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti provozu. MCSA je spolehlivá a ekonomicky výhodná diagnostická metoda umožňující identifikaci poruchy rotoru a statoru bez nutnosti odstavení analyzovaného asynchronního motoru. Tato diagnostická metoda se využívá pro periodické sledování stavu důležitých asynchronních motorů pracujících ve vlastní spotřebě elektráren.

Abstract

Most of the pumps, fans and compressors used today in nuclear and fossil fuel power plants for house consumption are run by asynchronous motors. High safety and operational reliability standards must be ensured when operating this equipment. MCSA is a reliable and economically advantageous diagnostic method enabling detection of rotor or stator faults without need to shut down the analysed asynchronous motor. The MCSA diagnostic method is used for periodic condition monitoring of important asynchronous motors operating in the power plant house consumption.

Úvod

V energetice používané asynchronní motory jsou prakticky vždy trojfázové složené ze statoru a rotoru. Stator je tvořen magnetickým obvodem a třífázovým vinutím, které je uloženo v drážkách na vnitřní straně. Jednotlivé fáze vinutí jsou pootočené o 120° a vytváří tak magnetické pole stálého prostorového tvaru, otáčející se synchronní rychlostí. Rotor je rovněž tvořen magnetickým obvodem, na jehož vnější straně jsou drážky a v nich umístěné klecové vinutí. Rotor se otáčí asynchronními otáčkami, které závisí na velikosti zatížení. Takto konstruovaný motor se nazývá asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Velké výkonové asynchronní motory mohou být navíc z důvodu lepšího chlazení vybaveny ventilátory na hřídeli rotoru a systémem chlazení statoru protékající chladicí vodou. [1, 2]

V případě jejich výpadku nebo poruchy může dojít k velkým ekonomickým ztrátám způsobeným v případě elektráren přerušením dodávky elektrické energie do elektrizační soustavy a případně i k ohrožení bezpečnosti a zdraví osob. [3]

A právě z těchto důvodů je v současné době provozovateli zařízení kladen čím dál větší důraz na možnou diagnostiku poruch a vznikajících závad. Je samozřejmostí, že provozovatel preferuje diagnostiku aktuálního stavu asynchronního motoru prováděnou za provozu bez nutnosti odstavení oproti diagnostikám prováděným na stojícím motoru. [3]

Frekvenční analýza statorového proudu asynchronního motoru pod zatížením je právě jednou z významných diagnostických metod, která umožňuje přímo za provozu motoru detekovat možné závady a poruchy rotoru a statoru. [3]

Teoretický popis diagnostické metody MCSA

Frekvenční analýza statorového proudu asynchronního motoru, jinak též nazývána MCSA (Motor Current Signature Analysis) metoda, je spolehlivá a ekonomicky výhodná diagnostická

metoda umožňující identifikaci případné poruchy rotoru a statoru bez nutnosti odstavení analyzovaného motoru. Princip metody spožívá ve frekvenční analýze napájecího statorového proudu asynchronního motoru pod zatížením.

U ideálního asynchronního motoru napájeného harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz se v proudovém frekvenčním spektru vyskytuje pouze dominantní první harmonická a její násobky. Výraznější jsou liché harmonické, které souvisí s rozložením vinutí v drážkách a změnou vodivosti vzduchové mezery vlivem drážkování. Vyšší harmonické mohou být obecně způsobeny drážkováním statoru a rotoru a obvykle se vyskytují harmonické jen do určitého řádu (jejich amplituda klesá s jejich řádem). [1, 2]

Případné poruchy rotoru a statoru asynchronního motoru jsou detekovány v analyzovaném frekvenčním spektru jako specifické frekvence, zpravidla rozdílné od harmonických frekvencí, v závislosti na technickém a konstrukčním uspořádání asynchronního motoru. Pro hodnocení stavu diagnostikovaného motoru se porovnávají v proudovém frekvenčním spektru amplitudy (měřené v decibelech) první harmonické s amplitudami ostatních frekvencí. Jestliže amplitudový rozdíl mezi první harmonickou a jinou specifickou frekvencí je menší než cca 40 dB, pak se zřejmě jedná o zhoršení technického stavu testovaného motoru s možnou identifikací příčiny závady. [1, 2]

MCSA metody se využívá u asynchronních motorů pro detekci statické a dynamické excentricity, poruchy rotorových tyčí, chyby ustavení motoru a poruchy vinutí statoru.

Standardní testovací proces pomocí MCSA metody spočívá v těchto čtyřech základních krocích:

Záznam okamžité hodnoty proudu statoru asynchronního motoru. Pro MCSA metodu postačuje záznam jedné fáze proudu. Pořízení kvalitního záznamu proudu statoru je velmi důležité (vhodná délka záznamu a vzorkovací frekvence, optimální měřící rozsah záznamového zařízení). [3]

Provedení analýzy frekvenčních spekter využitím diskrétní Fourierovy transformace (FFT) a Thompsonovu metodu odhadu spektrálního výkonu nad zaznamenaným průběhem okamžité hodnoty proudu statoru asynchronního motoru. [3]

Určení specifických frekvenčních spekter pro jednotlivé typy hledaných poruch a závad rotoru a statoru asynchronního motoru na základě štítkových hodnot motoru, konstrukčního uspořádání a aktuálního zatížení motoru. [3]

Identifikace specifických frekvencí a amplitudové úrovně těchto frekvencí ve frekvenčním spektru. Určení závažnosti a typu případné poruchy asynchronního motoru. [3]

U asynchronních motorů za provozu pod zatížením je zpravidla vyžadována diagnostika frekvenčních spekter statorových proudů za účelem zjištění případných poruch rotorových tyčí a zjištění excentricit rotoru. Navíc ustavení motoru se projevuje na frekvencích blízkých s frekvencemi excentricity dané mechanickou vazbou motoru a zátěže, a proto lze tato vyhodnocení spojit dohromady.

Záznam a vyhodnocení dat

Pro pořízení kvalitního záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru vhodného pro další zpracování metodou MCSA firma TES s.r.o. využívá mobilní měřící ústředny MOSAD[®]-6 v HW a SW konfiguraci přizpůsobené na přímé měření analogových veličin, tj. osazena analogovou měřící kartou.

Měřící ústředna MOSAD[®]-6 byla vyvinuta za účelem zaznamenání analogových a dvouhodnotových veličin při zkouškách elektrických zařízení elektrárenského bloku.

Pro zpracování a vyhodnocení záznamu okamžité hodnoty statorového proudu asynchronního motoru firma TES s.r.o. využívá SW produktu MCSATES. Tento SW produkt byl vyvinut firmou TES s.r.o. ve spolupráci s VUT Brno.

Analýza motoru nízkotlakého kompresoru o výkonu 315 kW

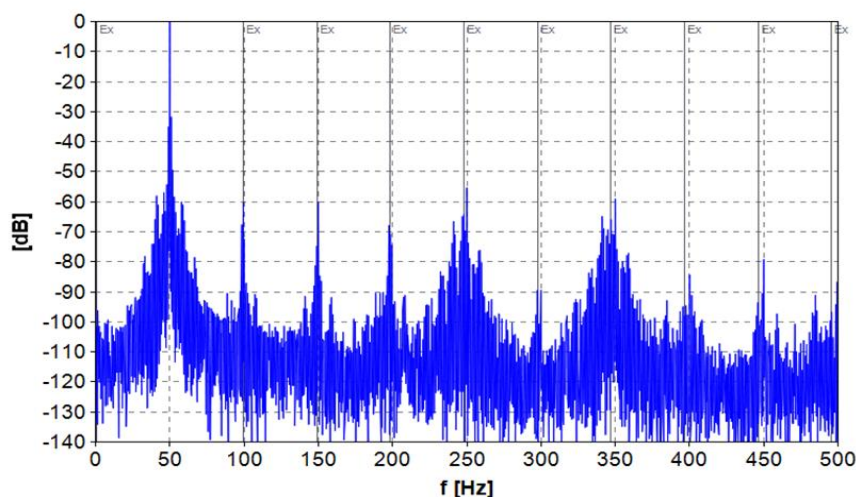
Metodou MCSA byla provedena diagnostika motoru kompresoru o jmenovitém výkonu 315 kW za účelem ověření aktuálního provozního stavu a případné identifikace poruchy rotorových tyčí, excentricity a ustavení rotoru. Tento motor vykazoval trvale za chodu vyšší oscilace a hlučnost. Motor kompresoru má šítkové hodnoty uvedené v tab. 1.

Tab. 1: Šítkové a technické hodnoty motoru

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon [kW]	315
Jmenovitý proud [A]	35,2
Frekvence [Hz]	50
Jmenovité napětí [kV]	6
$\cos \varphi$ [-]	0,86
Nominální otáčky [ot/min]	2959
Synchronní otáčky [ot/min]	3000
Skluz [%]	1,37
Počet pólových dvojic [-]	1

Excentricita a ustavení motoru

U všech sledovaných pásem byly nalezeny zvýšené úrovně frekvencí odpovídající výskytu excentricity. Úrovně se pohybují do hodnoty cca -60 dB. Sledovaná frekvenční pásma jsou uvedena na obr. 1 označena černými čarami.

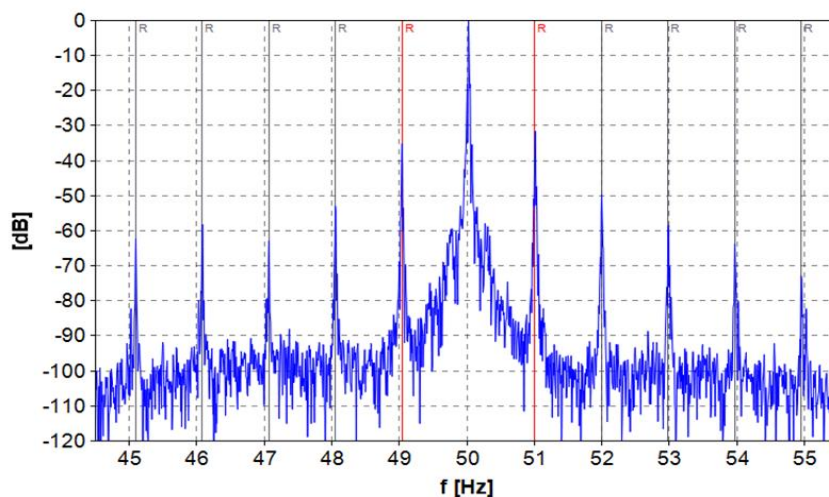


Obr. 1: Frekvenční spektrum pohonu nízkotlakého kompresoru v rozsahu 0 až 500 Hz

Poruchy rotorových tyčí

Analýza frekvenčních pásem (specifických frekvencí) detekujících poruchy rotorových tyčí ve frekvenčním spektru analyzovaného proudu statoru motoru kompresoru je zobrazena na obr. 2. Ve všech sledovaných pásmech byly nalezeny velmi vysoké úrovně frekvencí odpovídající poruchám rotorových tyčí. Nejvyšší úroveň byla ve sledovaném pásmu 49,0 Hz a 51,0 Hz a to cca -33 dB. Toto frekvenční pásmo je na obr. 2 označeno červenou barvou.

Tento stav motoru může být spojen s přerušením několika rotorových tyčí způsobující zvýšené oscilace rotoru motoru, a proto bylo dáno provozovateli tohoto zařízení doporučení na odstavení a následnou kontrolu a opravu rotorové klece motoru.



Obr. 2: Frekvenční analýza pro motor nízkotlakého kompresoru v rozsahu 44,5 až 55,5 Hz

Závěr

Možnost detekce závad nebo poruch u asynchronních motorů pod zatížením včetně identifikace místa závady je pro provozovatele těchto zařízení výhodná, jednak z důvodů cenové náročnosti vlastní diagnostiky a jednak z důvodu možnosti včasného naplánování opravy či výměny v případě zjištění zhoršujícího se technického stavu motoru. A právě využití analýzy frekvenčních spekter statorových proudů asynchronních motorů metodou MCSA je pro tento typ diagnostiky vhodný.

Na příkladu motoru kompresoru o výkonu 315 kW byla demonstrována účinnost této metody v případě reálné poruchy včetně identifikace místa poruchy, tj. rotorové klece.

Literatura

- [1] Sokanský, K. (2010): *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter*. VŠB-TU Ostrava, Ostrava.
- [2] Bednařík, V. (2012): *Diagnostika poruch rotoru asynchronních motorů*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno.
- [3] Mareček, O. (2016): *Frekvenční analýza napájecích proudů motorů*. Zpráva, arch. č. TES-Z-17-035, TES s.r.o, Třebíč.

MĚŘENÍ VIBRACÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU

VIBRATION MEASUREMENT USING A HIGH-SPEED CAMERA

Luboš Smolík a Roman Pašek

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Moderní vysokorychlostní kamery umožňují nahrávat video ve vysokém rozlišení (HD) snímkovací frekvencí vyšší než 1000 snímků za sekundu. Díky takto vysoké frekvenci snímání jsou ve videu zaznamenány vibrace natáčených objektů. Pokud je video zpracováno algoritmem pro *zvětšení pohybu* (*motion amplification*), je možné zaznamenané vibrace vidět pouhým okem. Příspěvek se zabývá metodikou měření vibrací zařízení a staveb pomocí vysokorychlostní kamery využívající algoritmus pro zvětšení pohybu, diskutovány jsou přednosti této zkušební metody i její limity.

Abstract

A state-of-the-art high-speed camera is capable of recording a video at more than 1000 frames per second (fps) at high definition (HD) resolution. Thanks to such a high frame rate, vibrations of the captured objects are recorded in the video. The vibrations are invisible to the naked eye unless the video is post-processed using a *motion amplification* algorithm. The motion amplification algorithm is introduced in this paper. Furthermore, a typical measurement workflow is described and advantages and limits of the introduced method are discussed.

Úvod

Systém pro měření vibrací kamerou se skládá z vysokorychlostní kamery, profesionálního laserového dálkoměru, počítače, který slouží k ukládání a vyhodnocování dat, a osvětlovací techniky napájené stejnosměrným napětím. Typická podoba systému je ukázána na obr. 1.



Obr. 1: Systém pro měření vibrací kamerou IRIS MX (bez osvětlovací techniky)

Předpokládejme nyní, že jsme pomocí vysokorychlostní kamery pořídili nahrávku vibrujícího zařízení se snímkovací frekvencí 1300 snímků za sekundu. Dle Nyquistova-Shannonova teorému je možné v této nahrávce analyzovat děje, jejichž frekvence je nižší než polovina sním-

kovací frekvence, tj. nižší než 650 Hz [1]. Pokud ale přehrajeme pořízenou nahrávku, budou na ní viditelné pouze vibrace s rozkmitem větším než zhruba 0,5 – 1 pixel.

Proto se pořízené video dodatečně zpracovává algoritmem pro *zvětšení pohybu* (*motion amplification*). Tento algoritmus analyzuje změnu jasu jednotlivých pixelů (obrazových bodů). Každý dostatečně světlý pixel nahrávky může být analyzován a ze změn jasu jsou získány informace o horizontálním a vertikálním pohybu pixelu [2]. Tyto informace mají formu časových řad, které mohou být dále zpracovávány např. frekvenčními filtry nebo rychlou Fourierovo transformací (FFT), která převádí data z časové oblasti do frekvenční [1].

Amplitudy pohybu jednotlivých pixelů jsou vypočítány na základě zadané vzdálenosti mezi objektivem kamery a měřeným povrchem. Proto je součástí měřicího systému laserový dálkoměr. Alternativně je možné měřit vibrace současně kamerou a kalibrovaným snímačem, např. akcelerometrem, a nastavit citlivost měření tak, aby si výsledky odpovídaly.

Frekvenční rozsah závisí na maximální snímkovací frekvenci kamery, obvykle je 0–700 Hz nebo vyšší. Minimální měřitelná amplituda vibrací je uváděna v rozsahu 1 – 2,5 μm .

Postup při měření

Měřicí metoda nevyžaduje žádné zvláštní úpravy povrchu zkoušených zařízení a technologií. I tak je příprava měření poměrně časově náročná.

Prvním krokem při přípravě měření je výběr místa, na kterém bude stát stativ s vysokorychlostní kamerou. Základními kritérii pro výběr místa jsou viditelnost povrchů zkoušených zařízení a technologií a minimální vibrace povrchu, na kterém bude stativ uložen. Měřicí systémy jsou vybaveny elektronickou či optickou stabilizací obrazu, přesto je kvůli minimalizaci chyb měření doporučeno stativ neumísťovat na vibrující povrch. Pokud takový povrch není k dispozici, je nutné stativ umístit na antivibrační podložky.

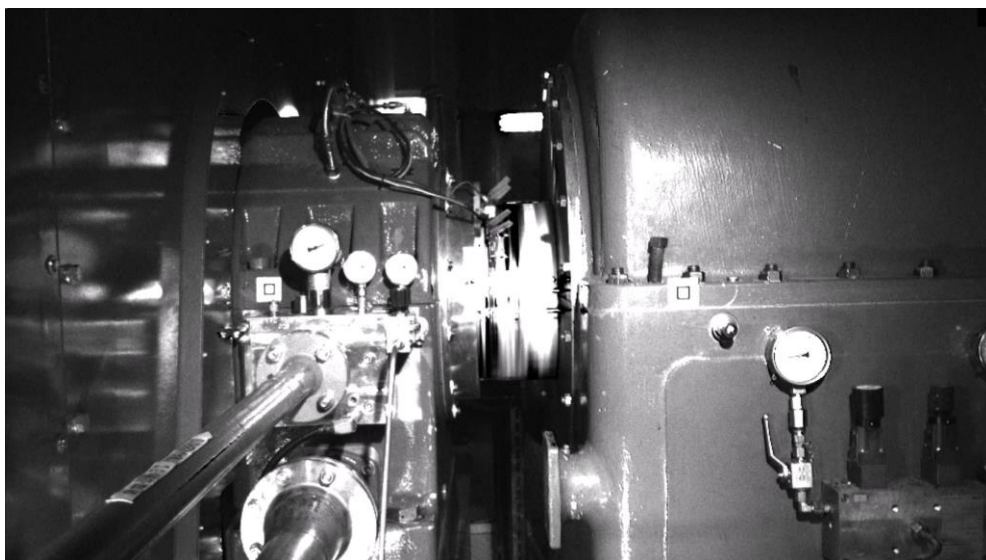
Dále je nutné zajistit dostatečné osvětlení měřených povrchů. Pro osvětlení se používají výhradně světelné zdroje napájené stejnosměrným napětím. Zdroje napájené střídavým napětím, např. ze sítě, mění intenzitu světla [3] a protože algoritmus pro zvětšení pohybu analyzuje změnu jasu pixelů, vedlo by použití takového světelné zdroje k hrubým chybám měření. S výběrem místa pro stativ a výsledným osvětlením zkoušených zařízení a technologií úzce souvisí volba objektivu kamery. Objektiv kamery je vybírán tak, aby měl dostatečnou světelnost a hloubku ostrosti a aby obsáhl celou scénu.

Typická nahrávka zkoušených zařízení a technologií je několik jednotek až desítek sekund dlouhá a je možné ji analyzovat přímo na místě. Problematické části zařízení a technologií se dále snímají v detailu nebo mohou být změřeny standardními kontaktními snímači.

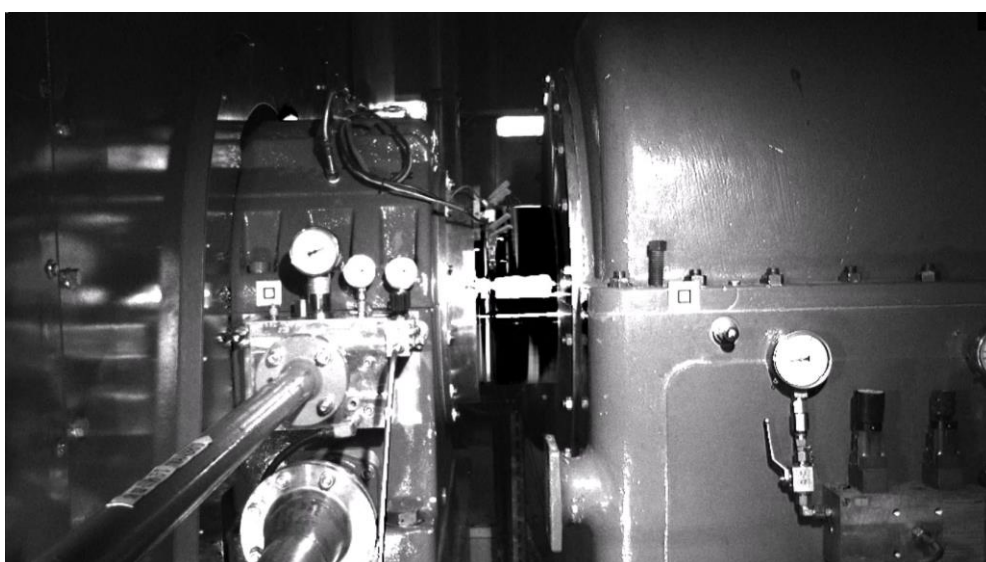
Využití měřicí metody a ukázky výsledků

Nespornou výhodou představené metody je okamžitá vizualizace provozního tvaru kmitu zkoušeného zařízení či technologie. Z vizualizace je možné ihned určit oblasti s vysokými amplitudami vibrací, dynamicky aktivní trhliny, poškozený spojovací materiál, nedostatečnou tuhost spojení jednotlivých částí zařízení apod. Kameru je také možné použít pro současnou analýzu většího množství zařízení nebo velkých konstrukcí. Díky frekvenčnímu rozsahu může být kamera využita i pro měření nízkofrekvenčních vibrací, což se využívá především při zkouškách mostů a lopatek a pylonů větrných elektráren.

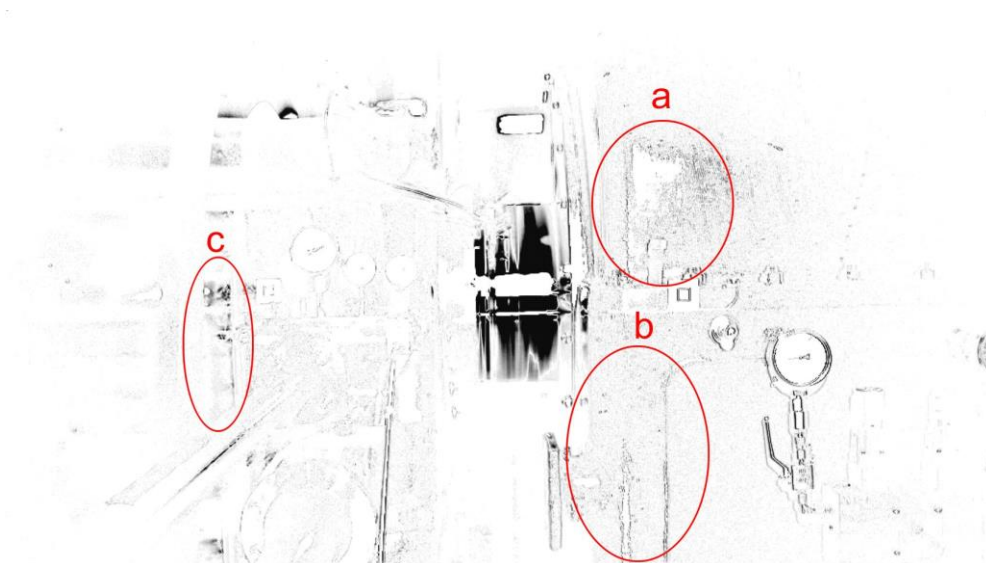
Výsledky z měření provozního tvaru kmitu dvojice ložiskových stojanů turbogenerátoru jsou ukázány na obr. 2 a obr. 3. Je zřejmé, že pro zobrazení výsledků jsou statické obrázky nevhodné a použití videa je prakticky nutné. Na obr. 4 jsou ukázány rozdíly mezi obr. 2 a obr. 3.



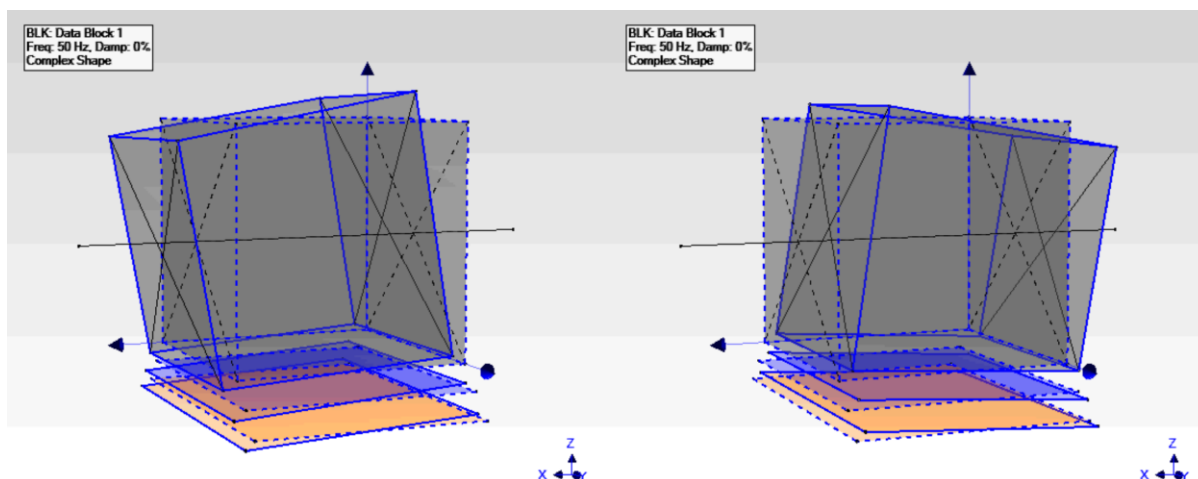
Obr. 2: Provozní tvar kmitu dvojice ložiskových stojanů na frekvenci 50 Hz



Obr. 3: Provozní tvar kmitu dvojice ložiskových stojanů na frekvenci 50 Hz



Obr. 4: Vizualizace rozdílů mezi obr. 2 a obr. 3



Obr. 5: Provozní tvar kmitu pravého ložiskového stojanu na frekvenci 50 Hz

Z obr. 4 je patrné, že se pravý stojan kmitá v axiálním (vodorovném vůči kameře) směru na otáčkové frekvenci 50 Hz, což je patrné především z posuvů pixelů v oblastech a) a b), zatímco levý stojan prakticky nekmitá. Také obě dělicí roviny jsou celistvé a v jejich oblasti nedochází k pružným deformacím stojanů. Dále na levé straně dochází ke značnému kmitání štítu statoru v axiálním směru, což se projevuje změnami v oblasti c). Černá neoznačená oblast uprostřed obr. 4 je způsobena otáčením hřídele a nesouvisí s kmitáním stojanů.

Výsledky měření byly verifikovány standardním měřením provozního tvaru kmitu pomocí snímačů zrychlení. Výsledky verifikační zkoušky jsou ukázány na obr. 5. Odtud je zřejmé, že se pravý stojan naklání, což způsobuje vysoké hladiny vibrací v axiálním a vertikálním směru. Spojení stojanu s příčnickem je ale dobré, uvolnění nebylo indikováno.

Výsledky obou měření si odpovídají a lze tvrdit, že pro danou aplikaci je měření pomocí vysokorychlostní kamery dostatečné.

Závěr

Měření vibrací vysokorychlostní kamerou, které využívá algoritmus pro zvětšení pohybu, je nová metoda, která otevírá celou řadu možností pro moderní diagnostiku zařízení a technologií. Značnou výhodou metody je frekvenční rozsah od 0 Hz a možnost měření většího množství zařízení současně. Díky tomu může být velmi snadno zjištěn výchozí (nulový) stav zařízení a technologií a lokalizovány případné poruchy. Metoda je limitována skutečností, že jde o optickou metodu, která je závislá na kvalitě osvětlení zkoušených zařízení. Určitou nevýhodou je také komplexnost výsledků, která sťažuje jejich prezentaci v tištěných zprávách a protokolech. V tištěných materiálech je nutné použít klasické výstupy ve formě grafů a tabulek. I tyto výstupy lze pomocí software kamery z videozáznamů získat.

Literatura

- [1] Norton, M. P., Karczub, D. G. (2003): *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-49561-6
- [2] Hay, J. (2018): *Basics of motion amplification*. Pumps & Systems, Vol. 26, No. 11, pp. 80-81. ISSN 1065-108X
- [3] Sekulovski, D. et al. (2016): *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*. Technical Note, CIE TN 006:2016, CIE, Vienna.

ZVÝŠENÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI PROVOZU SPALOVACÍCH KOMOR S HYBRIDNÍMI HOŘÁKY

LIFETIME PROLONGING AND OPERATIONAL RELIABILITY OF THE COMBUSTION CHAMBERS WITH HYBRID BURNER

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r.o., Brno, ČR

Abstrakt

Při provozu spalovacích turbín je nejefektivnější metodou snižování emisí použití hybridních hořáků. V příspěvku je popsán princip technologie hybridního hořáku na plynné palivo a jeho zásadní odlišnosti od klasických hořáků s difuzním spalováním. Jsou popsány základní problémy vznikající při technologii spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch. Hlavní pozornost je věnována zvýšenému sklonu k pulzačnímu hoření. Je provedena analýza vzniku tlakových pulzací a představeny rovnice, které musí být splněny, aby nedošlo k pulzačním tlakům, které by ohrozily nejenom spolehlivost provozu, ale i bezpečnost, protože při hodnotách tlakových pulzací větších než je 0,5 % jmenovitého tlaku ve spalovací komoře, může dojít k destrukci funkčních částí komory. Z analýzy vyplývá, že musí být splněny některé geometrické poměry mezi délkovými a příčnými rozměry hybridního hořáku. Protože geometrické poměry ovlivňují také proces míšení paliva se vzduchem, jsou ovlivněny rovněž emise NO_x a CO. Protože existuje velké množství variant geometrie hořáku, byl využit matematický model míšení paliva a vzduchu a sledován vliv na homogenitu směsi na výstupu z hořáku. Jsou rovněž představeny různé konstrukční varianty hybridního hořáku a jejich přednosti a nedostatky.

Abstract

The use of hybrid burners is the most efficient method of reducing emissions while operating a combustion turbine. The principle of hybrid burner technology for gas fuel and its basic differences with classical diffuse combustion burners is described. Basic problems arising from the combustion technology of premixed lean mixture of fuel and air is described. Main attention is paid to the increased tendency to pulsation burning. We analyze the occurrence of pressure pulsations and present the equations that must be met to avoid pulsating pressure that would not only compromise the reliability of the operation, but also the safety, because at pressure pulses bigger than 0.5% of the nominal pressure in the combustion chamber, the destruction of the functional chamber parts can occur. The analysis shows that some geometric ratios between the length and transverse dimensions of the hybrid burner must be met. Because geometric conditions also affect the fuel-air mixing process, NO_x and CO emissions are also affected. Since there are many variations of the burner geometry, a mathematical model of fuel and air mixing was used and the effect on the homogeneity of the burner output was monitored. Different variants of the hybrid burner design and their advantages and disadvantages are also presented.

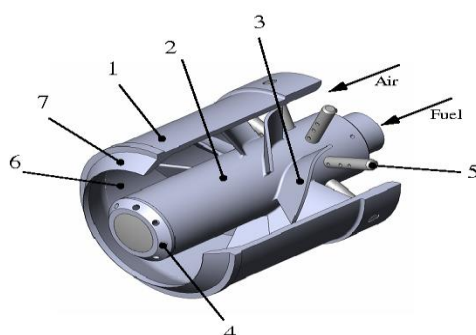
Úvod

Na počátku 90. let minulého století vyvstal u provozovatelů spalovacích turbín na tranzitní soustavě ze zemí bývalého SSSR do západní Evropy problém ochrany životního prostředí. Emisní limity byly v té době nastaveny na hodnoty $100 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ NO}_x$ a $300 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ CO}$. Tyto limity se neustále snižovaly a v současné době jsou na hodnotách $25 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ NO}_x$ a $33 \text{ mg Nm}^{-3} \text{ CO}$. Dosažení těchto limitů není možné dosáhnout při použití klasického způsobu spalování, kdy palivo a vzduch se přivádí do spalovacího prostoru odděleně a poté se mísí a hoří v primární zóně komory. Tento způsob se nazývá difuzní spalování. Emisní limity nelze dosáhnout proto, že při míšení paliva se vzduchem vznikají lokálně vysoké teploty plamene, což jsou

Spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch

Technologie spalování předem smíchané chudé směsi palivo – vzduch se zásadně liší od technologie spalování difúzním způsobem.

- úzký rozsah koncentrací pro stabilní hoření,
- možnost proskoku plamene do směšovací komory,
- možnost samovznícení směsi,
- zvýšený sklon k pulzačnímu hoření.



1 - plášť; 2 - centrální těleso; 3 - víříč; 4 -
otvory pro přívod paliva pro difuzní spalování;
5 - přívod paliva pro kinetický obvod; 6 -
směšovací komora; 7 - kuželové zúžení; 8 -
otvory pro přívod paliva do proudu vzduchu
(kinetický obvod)

Obr. 1: Hybridní hořák

Konstrukce nízkoemisního kombinovaného hořáku (hybridního)

Analýza vzniku tlakových pulzací a jejich odstranění

Pro jednotlivé veličiny na obr. 3 platí tyto rovnice:

$$(\dot{m}_A + \dot{m}_{\text{FP}}) = F_1 (\Delta p_{\text{VIR}} + \Delta p_p) \quad (1)$$

$$\Delta p_x = F_2 (\dot{m}_A + \dot{m}_{FP}) \quad (2)$$

$$\Delta p_{\max} = F_3 (\dot{m}_A + \dot{m}_{FP}) \quad (3)$$

$$\tau_{\text{MIS}} = \frac{L}{C} \quad (4)$$

Existence prodlevy mezi momentem přívodu paliva do proudu vzduchu a momentem, kdy se uvolní teplo o velikosti

$$\tau_{\text{MIS}} + \tau_{\text{X}}, \quad (5)$$

vede k určitému fázovému posuvu mezi kmitáním průtoku, tlaku a vývinu tepla a v důsledku toho mohou v proudu vznikat a udržet se pulsace tlaku.

Odstranění pulsací tlaku se řeší takto: průtok paliva se rozdělí na několik proudů, které se přivádí postupně v různých řezech do proudu vruchu (viz. obr. 3), přičemž dráha od řezu, v kterém se přivádí první proud do řezu, ve kterém se přivádí poslední proud je charakterizována časem:

$$\tau_{\text{PŘÍ}} = \frac{L_2 - L_1}{c}, \quad (6)$$

a poté se palivo a vzduch směšují v proudu na vzdálenosti L_1 , což charakterizuje čas mísení

$$\tau_{\text{MIS}} = \frac{L_1}{c}, \quad (7)$$

až se vytvoří chudá směs, která shoří v čase τ_{X} a tvoří se spaliny za silného vývinu tepla. Přitom musí být splněna rovnice (tato rovnice je patentována):

$$1,2 < \frac{\tau_{\text{PŘÍ}} + \tau_{\text{MIS}} + \tau_{\text{X}}}{\tau_{\text{MIS}} + \tau_{\text{X}}} < 2,0. \quad (8)$$

Vliv tlakových pulzací na životnost a spolehlivost provozu spalovacích turbín

Nízkoemisní hybridní hořák byl použit na spalovacích komorách turbín GT 750-6, které slouží k pohonu kompresorů na plynovodu, který vede mimo jiné přes Slovensko, Českou republiku do Německa. V těchto lokalitách bylo dosaženo těchto parametrů:

a) Koncentrace emisí škodlivin při normálních podmínkách přepočtena na 15 % O_2 ve spalínách v rozsahu výkonů 30 – 100 % nominálního výkonu.

$$\text{NO}_x < 25 \text{ mg Nm}^{-3}$$

$$\text{CO} < 30 \text{ mg Nm}^{-3}$$

b) Provoz bez samovznícení směsi paliva a vzduchu ve směšovací komoře pro všechny zatížení

c) Dlouhodobý provoz bez tlakových pulzací větších než 0,025 bar

Bylo experimentálně ověřeno, že tlakovými pulzacemi s dvojamplitudou větší než 0,1 bar dochází k těmto poruchám:

- praskání svarů čela plamence,
- vytloukání čepů pro uchycení plamence v plášti spalovací komory,
- slehávání izolace spalínovodu mezi spalovací komorou a vysokotlakou turbínou,
- praskání kuželky vstupního hrdla vysokotlaké turbíny.

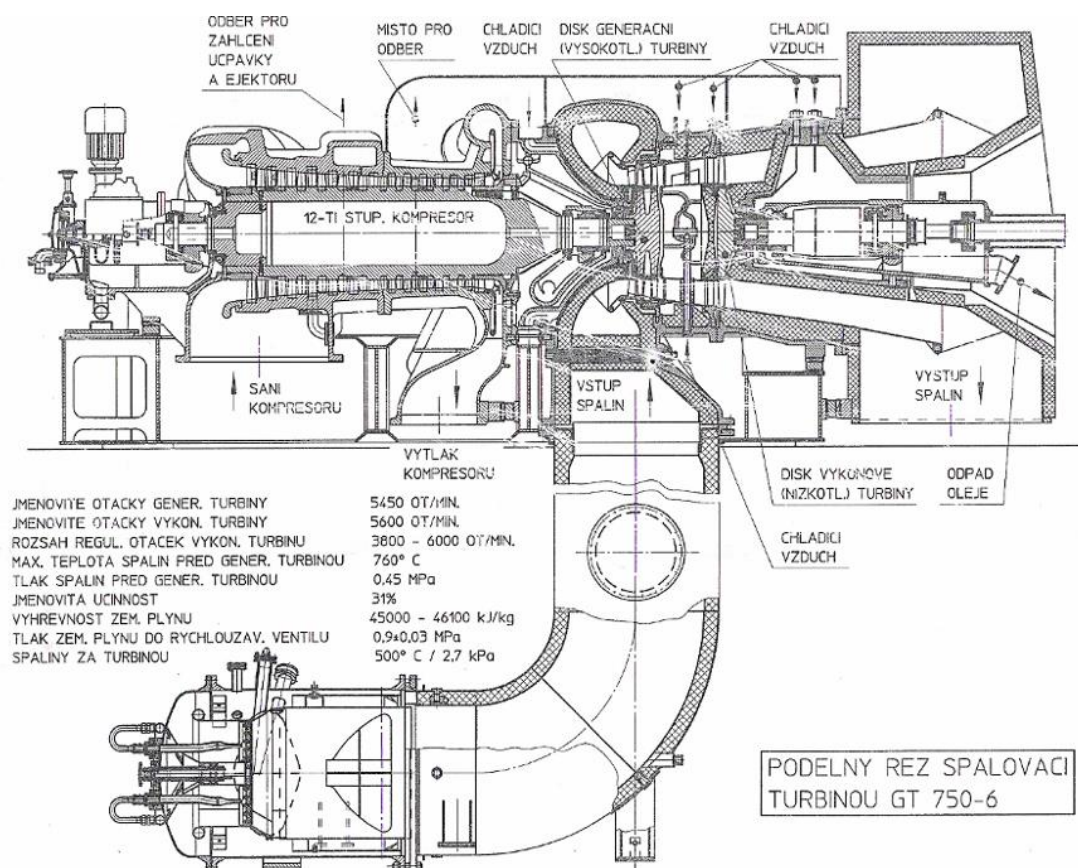
Závěr

Odstraněním tlakových pulzací při provozu nízkoemisního hybridního hořáku byl umožněn dlouhodobý spolehlivý provoz spalovacích turbín s životností více jako 200 000 provozních hodin.

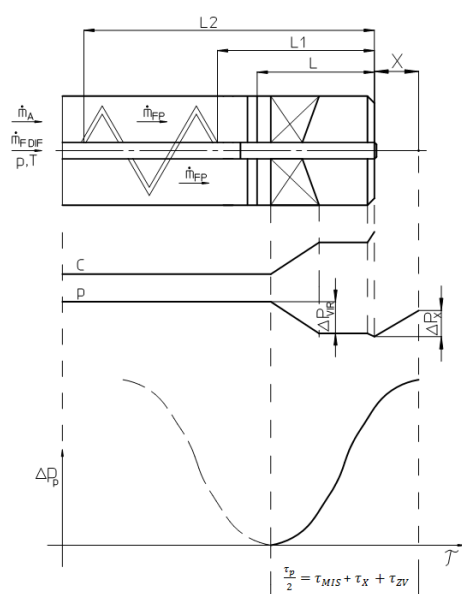
Literatura

- [1] Veselý, S. (2007): *Spalovací komory spalovacích turbín*. Galant Brno, s.r.o., Brno. ISBN 80-239-6657
- [2] Veselý, S. (2008): *Spalovací turbíny, termodynamika a základy konstrukce*. Galant Brno, s.r.o., Brno.

- [3] Veselý, S. (2008): *Hybridní hořák s regulací hmotnostního průtoku primárního vzduchu*. Inaugurační přednášky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava. ISBN 978-80-254-3011-8



Obr. 2: Podélný řez spalovací turbínou GT 750-6



Na obr. 3 je označeno:

- $\dot{m}_A$ – hmotnostní průtok vzduchu
- $\dot{m}_{FDIF}$ – hmot. průtok paliva v dif. obvodu
- $\dot{m}_{FP}$ – hmot. průtok paliva v premix obvodu
- p – tlak
- T – teplota
- X, L, L_1, L_2 – vzdálenosti
- Δp_p – tlakové pulsace
- Δp_{VIR} – tlaková ztráta ve vířiči
- Δp_x – zvýšení tlaku při vývinu tepla
- c – rychlost
- τ_p – doba tlakového pulsu
- τ_{MIS} – doba mísení
- τ_X – doba vývinu tepla
- τ_{ZV} – doba pro proběhnutí zvukové vlny

Obr. 3: Schéma hybridního hořáku EST-1 a EST-2M

SIMULACE PŘESTUPU TEPLA V MODELU UCPÁVKY PÁRY

HEAT-TRANSFER SIMULATIONS IN MODEL OF STEAM SEALING

Milan Schuster

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň,
e-mail: schuster@vzuplzen.cz

Abstrakt

Príspevek se zabývá simulačními výpočty proudění páry v modelu rotorové labyrintové ucpávky parní turbíny. Jsou zmíněny možnosti simulací proudění páry a přestupu tepla a tvorba výpočtového modelu. Příspěvek přináší vyhodnocení výsledků proudění páry při různých režimech provozu turbíny, které byly zadány pomocí kombinace povrchových teplot stěn rotoru, vnitřního a vnějšího tělesa. Výsledky popisují způsob tepelného zatížení komponent parní turbíny za různých režimů. Příspěvek dokumentuje výzkum a výsledky pracovního balíku WP5 projektu CESEN.

Abstract

The paper deals with simulations of steam flow in a model of a rotor labyrinth seal of a steam turbine. Possibilities of simulation of steam flow and heat transfer and creation of computational model are mentioned. The paper presents an evaluation of the results of steam flow in various modes of turbine operation, which were entered using a combination of surface temperatures of the walls of rotor, inner and outer body. The results describe the way of thermal loading of steam turbine components under different modes. The paper summarizes the research and results of the WP5 work package of the CESEN project.

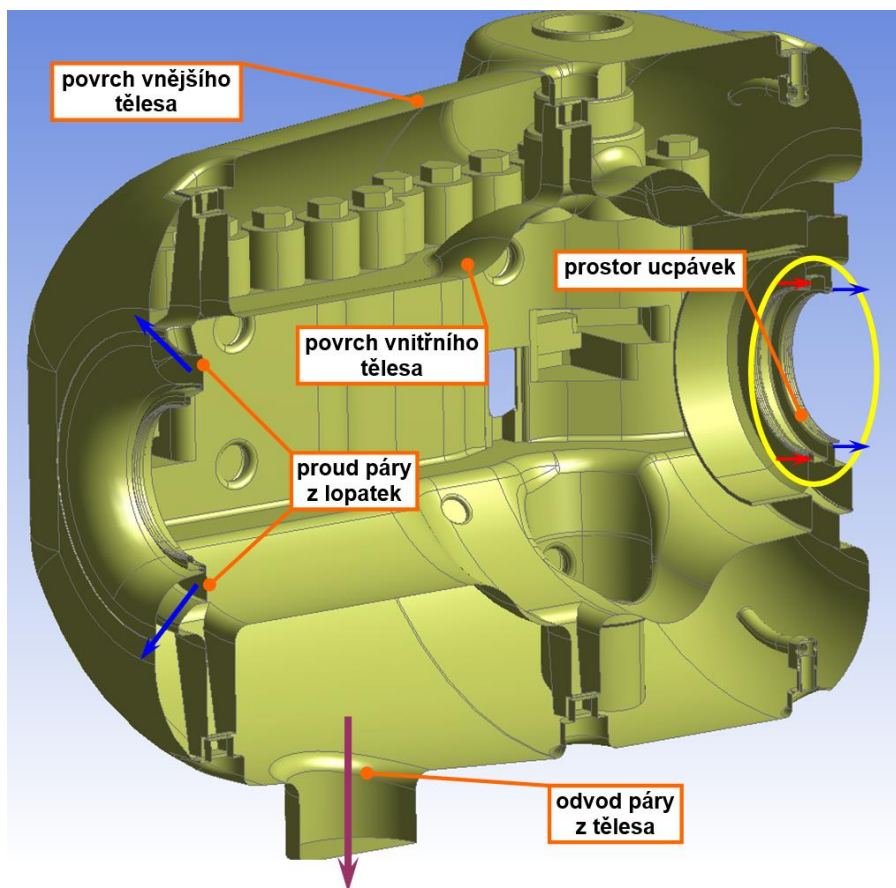
Úvod

Proudění a sdílení tepla, které souvisí s přenosem a přeměnou energií, jsou základními principy funkce většiny energetických zařízení, i parních turbín. Počítačové simulace umožňují zkoumat řadu konstrukčních a provozních variant komponent parní turbíny. Zajímavou částí průtočného traktu parní turbíny z hlediska bilance tepla je jednak prostor mezi vnitřním a vnějším tělesem turbíny, ve kterém proudí pára vystupující z lopatkové části, pára směřující do vnější ucpávky a pára prostupující z vnitřních ucpávek, a jednak vlastní rotorová ucpávka. Na obr. 1 je model prostoru mezi vnějším a vnitřním tělesem vysokotlakého dílu parní turbíny s vyznačením hlavních směrů proudění páry a významných částí (včetně prostoru rotorové ucpávky).

Mezitělesový prostor představuje pomalé proudění páry ve velkém objemu, naopak labyrintová ucpávka představuje přestup tepla z malého množství rychle proudící páry ve velmi úzkém kanálu labyrintu. Simulace přestupu tepla v modelech variant mezitělesového prostoru byly popsány a publikovány v článcích [1] a [2]. Tento příspěvek se stručně věnuje souvislostem simulací přestupu tepla v modelu labyrintové ucpávky.

Výpočtový model ucpávky

Výpočtový model pro CFD simulace úloh přestupu tepla v modelu ucpávky zahrnuje veškeré zadání, tvar modelu, výpočtovou síť a parametry numerického řešení. Základní model ucpávky byl vyvinut a ověřována jeho „těsnící“ funkce pro nominální parametry, popsáno v pracích [3] a [4]. Pro řešení byl celý systém rotorové ucpávky rozdělen do několika sekcí vzhledem k odlišnému tvaru břitů labyrintu a vzhledem k poloze kanálů meziprostoru pro odsávání a odvodu páry, tím vznikly dílčí modely pěti labyrintových sekcí a čtyř meziprostorů kanálů. Celý složený model ucpávky je naznačen v levé horní části na obr. 2a. Model ucpávky byl jednak řešen jako celek a jednak samostatně po jednotlivých sekcích.

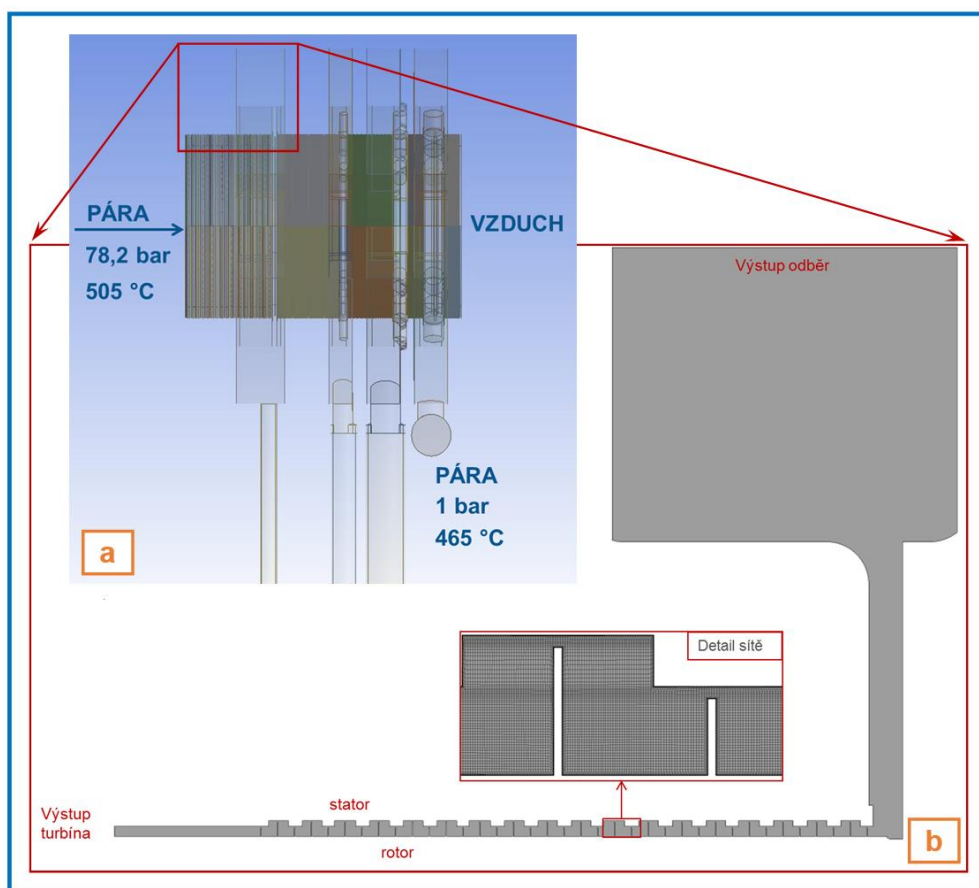


Obr. 1: Schéma řezu modelem mezitělesového prostoru

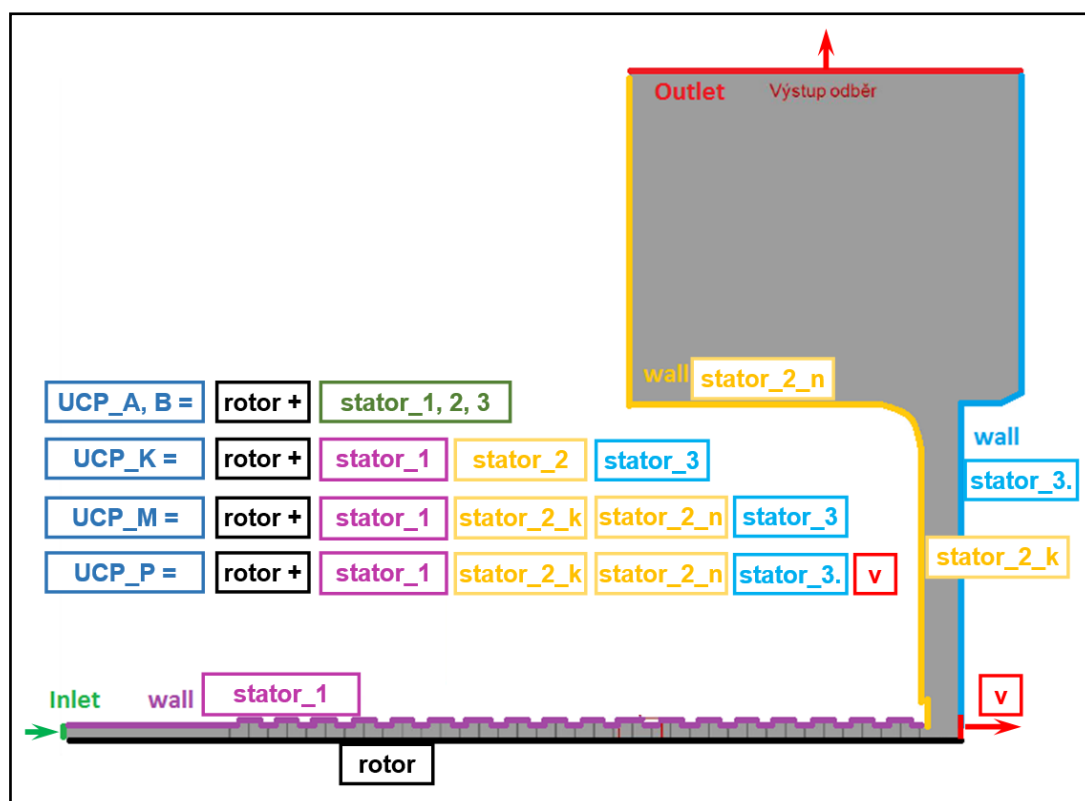
V příspěvku je popisována nejdůležitější přední sekce nejbližší vnitřnímu prostoru průtočné části vysokotlakého dílu turbíny (obr. 2b), která byla vybrána pro další vývoj a inovace výpočtového modelu přestupu tepla. Cílem vývoje výpočtového modelu ucpávky je řešení tepelných polí v ucpávce při různých provozních režimech turbíny. Režimy byly zadávány různými parametry pro okrajové podmínky výpočtů (hodnoty povrchových teplot vybraných stěn modelu).

Model ucpávky přední sekce byl vytvořen jako dvourozměrný model s jemnou hustou výpočetní sítí včetně „mezí vrstvy“ (obr. 2b), model umožňuje simulovat procesy s průnikem páry do ucpávky včetně rotace hřídele rotoru, tvaru břitů ucpávky a částí turbínového tělesa jako statoru. Statorem je nerotující plocha vnitřního a vnějšího tělesa, která tvarem svých částí vytváří celý trakt kanálků a labyrintových zahloubení pro vytvoření ucpávky. Rotorem je rotující plocha hřídele se všemi břitů pro vytvoření labyrintu. Vstupem do modelu je plocha mezery, kterou vstupuje pára z vnitřních prostor VT tělesa do ucpávky, a výstupem je plocha, kterou pára odchází do kanálků traktu odvodu. Na obr. 3 je schéma modelu přední ucpávky s naznačenými variantami kombinací okrajových podmínek.

Model přední ucpávky byl postupně vyvíjen a vytvořen v několika variantách, které umožňovaly změnu typů okrajových podmínek s cílem simulace změn tepelného zatížení jednotlivých částí modelu při různých provozních režimech turbíny. Model ucpávky ve variantě UCP-A/B řešil změnu teploty páry (na obr. 3), modely UCP-K a UCP-M umožnily rozdělení stěny „statoru“ na několik částí a tím přesněji řešit situace s odlišnou teplotou vnitřního tělesa („stator_1 a _2“) a vnějšího tělesa („stator_3“). Model UCP-P sloužil ke studiu vlivu výstupu páry do následných traktů ucpávky („v“) na celkovou bilanci tepla.



Obr. 2: Model ucpávky pro simulace: a) celá ucpávka, b) varianta přední sekce ucpávky



Obr. 3: Schéma všech variant modelu ucpávky se zvolenými typy okrajových podmínek

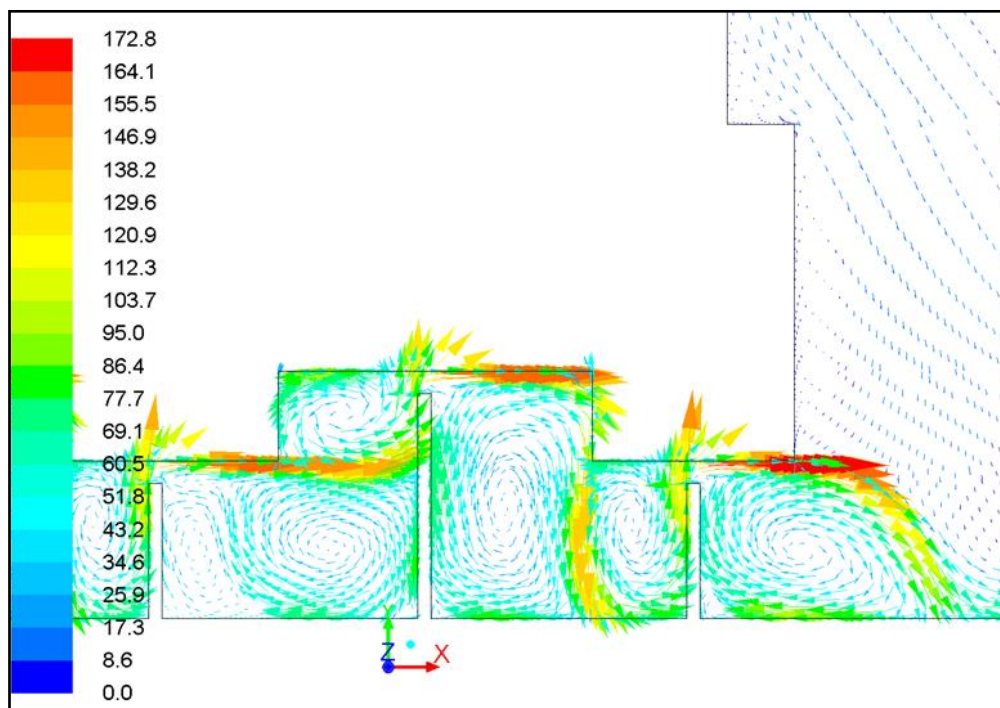
Všechny modely ucpávky byly vytvořeny ve dvoudimenzionální formě a měly prakticky shodné nastavení parametrů numerického procesu simulačních výpočtů. Axisymetrická výpočetní metoda v kombinaci s vybraným turbulentním modelem umožnily řešení simulací prostorového proudění páry a přestupu tepla.

Nastavení parametrů okrajových podmínek na stěně děleného statoru modelů UCP odpovídalo tepelnému zatížení za provozu turbíny, které bylo zadáváno pomocí povrchových teplot stěn modelu. Pro všechny modely UCP byly zadávány teploty pro stěnu „rotor“ 490 °C. Pro základní model UCP-A/B byla teplota stěny „stator“ proměnná v rozsahu 490–520 °C. Ostatní modely UCP s dělenou stěnou statoru měly zadáno pro stěnu „stator_3“ 490 °C, pro stěny „stator_1“ a „stator_2“ byly teploty proměnné opět v rozsahu 490–520 °C s tím, že teplota pro „stator_2“ byla rovna nebo menší než teplota stěny „stator_1“. Příklad kombinací teplot pro jednotlivé modely UCP je patrný z tabulek výsledků (tab. 1).

Výsledky

Výzkumné úkoly v rámci balíku WP5 projektu CESEN byly zaměřeny jednak na vývoj a testy výpočtových modelů pro řešení tlakových a teplotních polí v úzkém kanálu turbínové ucpávky (včetně ověření ucpávací funkce modelové ucpávky) a jednak na zjištění podmínek přestupu tepla mezi rotorem, státorem a párou za různých režimů provozu turbíny.

Výsledné výpočtové modely umožnily simulovat procesy přestupu tepla v rotorové ucpávce za různých podmínek. Vývoj rychlostního pole v modelu ucpávky při nominálním provozu je na obr. 4, situace je ilustrována vektory rychlosti páry ve výstupní části modelu ucpávky. Změny velikosti rychlosti, změny směru proudění a zavíření páry při průchodu labyrintem ukazují těsnicí funkci ucpávky.



Obr. 4: Proudění páry v části ucpávky na výstupu do odváděcího kanálu (vektory rychlostí, hodnoty v m/s)

Výsledkem simulací přestupu tepla v částech modelové ucpávky jsou hodnoty součinitele přestupu tepla. Součinitel umožňuje vyjádření tepelného zatížení a změn přestupu tepla v modelu ucpávky za různých provozních režimů. Simulace režimů jsou zadávány pomocí povrchových teplot stěn těles a rotoru v okolí ucpávky. V tab. 1 jsou uvedeny získané hodnoty součinitele přestupu tepla pro jeden typ modelu ucpávky v pořadí podle vzestupné hodnoty zadávané teploty stěny „stator_1“ (490–520 °C) pro všechny kombinace zadáných teplotně zatěžovacích variant (pro vybraný model označeno K01 – K34). Hodnoty výsledného součinitele přestupu tepla jsou pro všechny stěny modelu různé. Pro stěny „rotor“ a „stator_3“ jeho hodnota vykazuje určitý vývoj a citlivost ke změnám zadání variant. Pro stěnu „stator_1“ je pro většinu variant hodnota součinitele záporná, dáno vlivem teplejší stěny „stator_1“ vzhledem k teplotě páry. Hodnoty součinitele pro stěnu „stator_2“ ukazují pro tento model UCP-K na složitější souvislosti mezi teplotou stěny a proudící páry. Proto byl připraven model ucpávky UCP-M, u kterého byla stěna „stator_2“ upravena pro lepší sledování hodnot součinitele, byla rozdělena na úzkou část odváděcího kanálu „stator_2_k“ a rozšířenou část výstupu „stator_2_n“, v obou částech jsou odlišné podmínky proudění páry.

Tab. 1: Hodnoty součinitele přestupu tepla pro model UCP-K (popis v textu)

Zadáno			Součinitel přestupu tepla [W/m ² K]			
var.	tepl. stěn BC (stator 1/2) [°C]		rotor	stator_1	stator_2	stator_3
K01	490	490	1381.008	575.907	10.990	42.049
K11	500	490	1803.629	-645.505	15.897	82.803
K12	500	500	1827.026	-645.198	-297.746	150.043
K21	510	490	2263.831	-3045.842	44.030	133.647
K22	510	500	2340.827	-3141.156	-304.763	168.170
K23	510	510	2261.383	-3075.783	-1292.250	215.468
K31	520	490	2734.415	-8931.239	62.665	189.514
K32	520	500	2676.774	-6606.447	-245.196	230.277
K33	520	510	2700.406	-7224.231	-1200.633	295.295
K34	520	520	2678.959	-6679.385	1950.226	309.229

Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla dokládají a dostatečně kvantifikují tepelnou bilanci a podmínky přestupu tepla v částech labyrintové ucpávky za různých provozních režimů turbíny. Pro další studium tepelných poměrů jsou hodnoty součinitelů přestupu tepla uloženy v datových souborech a v jednoduchých grafických výstupech. Výsledkem projektu jsou i výpočtové modely variant ucpávky (UCP-i), které lze využít k dalším výpočtům přestupu tepla v labyrintové ucpávce i pro jiné provozní stavy (a jiné rozsahy zadávaných povrchových teplot.

Závěr

Příspěvek je zaměřen na problematiku řešení simulací sdílení tepla v rotorové labyrintové ucpávce (jako části reálné parní turbíny) při zahrnutí podmínek různých provozních režimů. Etapový výzkum problematiky přinesl jednak odladěný výpočtový model labyrintové ucpávky s ověřenou těsnicí funkcí [4], jednak sadu inovovaných výpočtových modelů přední sekce ucpávky [5] a konečně soubory hodnot součinitele přestupu tepla, které charakterizují tepelné poměry v ucpávce při zadaných provozních režimech turbíny [6]. Výsledky výzkumů jsou využitelné při sledování tepelného zatížení komponent parní turbíny a při hodnocení vlivů změn provozních režimů na funkci ucpávky.

Poděkování: Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu centra kompetence TAČR č. TE01020068 (CESEN – Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky).

Literatura

- [1] Schuster, M. (2013): Simulace termodynamiky komponent parní turbíny. *Sborník 8. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 177-180. ISBN 978-80-261-0272-4
- [2] Schuster, M. (2014): Modelování procesů sdílení tepla v energetických zařízeních. *Sborník 9. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 211-214. ISBN 978-80-261-0406-3
- [3] Klečková, J., Hamza, J. (2014): Proudění páry v labyrintové ucpávce. *Sborník konference „ANSYS 2014 – Setkání uživatelů a konference“*, TechSoft Eng. Praha, Dolní Morava. ISBN 978-80-905040-9-7
- [4] Klečková, J. (2015): *Modelování proudění páry v rotorové ucpávce parní turbíny*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-35/15/058, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.
- [5] Schuster, M. (2018): *Analýza proudění a přestupu tepla v modelu turbínové ucpávky*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/18/018, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.
- [6] Schuster, M. (2019): *Inovovaný model turbínové ucpávky pro simulace tepelného zatížení*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/19/010, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. a CESEN, Plzeň.

VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ OPĚRNÝCH PRVKŮ JADERNÝCH REAKTORŮ

COMPUTATIONAL EVALUATION OF NUCLEAR REACTORS SUPPORT ELEMENTS

Jan Lazar, Kamil Šimeček, Petr Polcar a Petr Kindelmann

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

Abstrakt

Pro zajištění dlouhodobé spolehlivosti energetických zařízení a případné prodloužení jejich provozu je potřeba hodnotit stav jednotlivých komponent z hlediska zbytkové životnosti. Některé komponenty, zejména takové, ke kterým je ztížený přístup, je potřeba hodnotit výpočtově. Předkládaný příspěvek popisuje výpočtové aktivity při hodnocení statické pevnosti, nízkocyklové únavy a vysokocyklové únavy při vibracích opěrných prvků jaderného reaktoru dle Normativně technické dokumentace A.S.I. Je představen princip výpočtu, MKP modely jednotlivých komponent opěrných prvků, následně popsány výpočty napěťových a teplotních polí a jejich vyhodnocení.

Abstract

To ensure long-term reliability of power equipment and eventual prolongation of their lifetime it is necessary to evaluate the condition of individual components in terms of their residual life. Some of the components, especially those where access to is difficult, need to be simulated. Presented paper describes computational activities in evaluation of static strength, low and high cycle fatigue according to A.S.I. normative technical documentation. Simulation approach, FEM models of individual components of supporting elements are introduced followed by description of calculations of stress and temperature fields and their evaluation.

Úvod a motivace

Jaderné zdroje lze zařadit mezi bezemisní technologie, a nejen z toho důvodu je žádoucí prodloužování životnosti stávajících a výstavba nových zařízení. Pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti je nutné prokázat způsobilost jednotlivých komponent v souladu s Normativně technickou dokumentací A.S.I. Výpočtáři společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. se podílejí na výpočtovém hodnocení opěrných prvků tlakových nádob reaktorů (TNR) VVER-1000 a VVER-440. Pro hodnocení byly simulovány provozní režimy s využitím metody konečných prvků a komerčního programu ANSYS [1]. Vzhledem k omezenému rozsahu příspěvku se v dalším textu omezíme na příklady z hodnocení opěrných prvků TNR VVER-1000.

Při znalosti jednotlivých kampaní a jejich počtů je možné výpočtetně stanovit namáhání při provozních režimech a následně únavové poškození a zbytkovou životnost jednotlivých komponent. Tato znalost je stěžejní a napomůže případnému rozhodnutí o prodloužení doby provozu jaderné energetických zařízení, případně dodá informaci o kritických komponentech, na které je potřeba se zaměřit.

Hodnocené režimy

Jednotlivé provozní režimy, které byly výpočtově hodnoceny, shrnuje tab. 1. Z posloupnosti těchto zátěžných stavů byly následně sestaveny provozní režimy. Původy uvažovaných zatížení jsou vlastní hmotnost, tlak chladiva na stěnu TNR, tepelné namáhání při provozu, silové působení na nátrubky TNR a tlakové pulsace způsobené chodem hlavního cirkulačního čerpadla.

Tab. 1: Hodnocené režimy při výpočtovém hodnocení opěrných prvků TNR VVER-1000

Zn.	Pojmenování zátěžného stavu	Zátěž
0	Reaktor otevřen, horní blok sejmut, AZ a VČR vyjmuty	Tíha reaktoru (TNR, chladivo), síly na nátrubky
1	Reaktor otevřen, zaplněn	Tíha reaktoru (TNR, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky
1a	Reaktor uzavřen	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky
2	Tlaková zkouška na těsnost 17.6 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky, tlak chladiva
3	Tlaková zkouška na pevnost 24.4 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky, tlak chladiva
4	Tlaková zkouška na pevnost, snížený tlak 19.6 MPa, 130 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky, tlak chladiva
5	Reaktor na plném výkonu, 16 MPa, 320 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky, tlak chladiva, tepelné zatížení, (+ tlakové pulsace od HCC při hodnocení vibrací)
6	Reaktor na nulovém výkonu 16 MPa, 320 °C	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky, tlak chladiva, tepelné zatížení
7h (LOCA)	Loss-of-coolant accident, roztržení horké smyčky hlavního chladicího potrubí	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČ, chladivo), síly na nátrubky včetně sil od přesušeného potrubí, tlak chladiva
7s (LOCA)	Loss-of-coolant accident, roztržení chladné smyčky hlavního chladicího potrubí	Tíha reaktoru (TNR, HB, AZ, VČR, chladivo), síly na nátrubky včetně sil od přesušeného potrubí, tlak chladiva

Metodika výpočtů

Výčet uvažovaných zatížení opěrných prvků (OP) je uveden tab. 1, lze je rozdělit takto:

- (i) statická zatížení mechanického původu (vlastní tíha, tlak chladiva na TNR, síly na nátrubky TNR),
- (ii) zatížení statickým teplotním polem a
- (iii) zatížení dynamickými silami vyvolanými funkcí HCC.

K výpočtu rozložení napětí je ve všech případech použit statický výpočet.

Zatížení (ii) a (iii) lze díky konstrukci OP vyhodnotit nezávisle pro nosný a opěrný systém, pro hodnocení zatížení (i), tj. zatížení od vlastní hmotnosti a od sil působících na nátrubky TNR, musíme uvažovat interakci mezi všemi 3 hlavními komponentami: nosným systémem, opěrným systémem a TNR, zkráceně TNR–OP.

Vzhledem k výpočetní náročnosti bylo nutné rozdělit výpočet na dílčí části, které již budou řešitelné programem ANSYS nainstalovaným na standardním hardware. Kde to geometrie OP a charakter zatížení dovoluje, bylo využito symetrie úlohy:

- Teplotní výpočet a výpočet mechanických napětí od teplotních polí jsou provedeny na sektorech opěrného a nosného systému.
- Výpočet mechanického napětí v opěrném a nosném rámu je proveden na modelu jednoho celého nosníku a jeho bezprostředního okolí.

Na obr. 1 až obr. 4 jsou vyobrazeny geometrie všech modelů, použitých při výpočtech.

Výpočet byl proveden v následujících krocích:

- (i) příprava modelů pro výpočet napětí teplotního původu: model symetrické části opěrného systému model symetrické části nosného systému,
- (ii) výpočet rozložení teplot,
- (iii) výpočet napětí teplotního původu,
- (iv) příprava modelů pro výpočet tuhostí nosníků a pro výpočet napětí mechanického původu v nosnících: opěrný rám a nosný rám,
- (v) výpočet tuhostí opěrného a nosného rámu,
- (vi) příprava dalších modelů pro výpočet napětí mechanického původu: model TNR-OP, dílčí modely: opěrný kruh a nosný kruh; v těchto modelech jsou nosníky nahrazeny elementy, které mají stejnou tuhost jako nosníky,
- (vii) zatížení modelu TNR-OP vlastní hmotností reaktoru a silami na nátrubky, určení zatížení dílčích modelů (tj. modelů opěrného rámu, opěrného kruhu, nosného rámu a nosného kruhu),
- (viii) zatížení dílčích modelů zatížením vypočteným na modelu TNR-OP, výpočet napětí,
- (ix) zatížení dílčích modelů silami vyvolanými činností HCČ.

Součet napětí od teplotních a od mechanických zatížení lze realizovat (a) přenosem pole napětí mezi modely – náročnost a vhodnost této metody závisí na orientaci a rozsahu (tj. použití eventuálních symetrií) geometrií jednotlivých modelů, (b) součtem tenzoru napětí nebo hodnoty redukovaného napětí pouze ve vybraných bodech nebo (c) součtem tenzorů napětí linearizovaných podél odpovídajících SCL. Metoda (a) je použita při hodnocení nosníků opěrného a nosného rámu, metoda (b) je použita při hodnocení únavy, metoda (c) je použita při hodnocení statické pevnosti opěrného a nosného kruhu.

Z důvodů snížení výpočetní náročnosti jsou opěrný a nosný rám v modelech TNR-OP, opěrného kruhu a nosného kruhu nahrazeny zjednodušenými modely s ekvivalentními tuhostmi. Při formulaci zjednodušených modelů OP jsou uvažovány tyto stupně volnosti:

Nosník nosného rámu:

- vertikální posuv v místě kontaktu nosník nosného rámu – ustavovací klín,
- horizontální posuv v místě kontaktu nosný kruh – pojišťovací kolík,
- vertikální posuv v místě kontaktu pojišťovací kolík – klín pojišťovacího kolíku.

Nosník opěrného rámu:

- Horizontální posuv v místě kontaktu kronštejn – hřeb.

Všechny tuhosti mají rozměr [N/mm] a postup jejich výpočtu je následující:

- (i) zatížení kontaktní plochy nosníku silou F_{DOF} ve směru odpovídajícího stupně volnosti,
- (ii) odečet posuvu Δ_{DOF} ,
- (iii) výpočet tuhosti OP (F_{DOF}/Δ_{DOF}).

Postup určení tuhostí je ilustrován obr. 5 a obr. 6.

Výpočty únavového poškození od nízkocyklové únavy byly provedeny v souladu s kap. 8 a kap. 10 normy [4]. Pro výpočty fiktivních napětí při hodnocení únavového poškození byla použita méně konzervativní metoda ekvivalentní energie. Výpočty únavového poškození byly provedeny ve vybraných bodech volených v oblastech, kde bylo dosaženo maximálního napětí v jednotlivých zátěžných stavech. Na základě proběhlých režimů provozu byla pro výpočet

únavového poškození opěrných elementů TNR ETE zpracována posloupnost režimů. Pro hodnocení únavového poškození byly provedeny prognózy počtu zátěžových cyklů pro 60 let budoucího provozu.

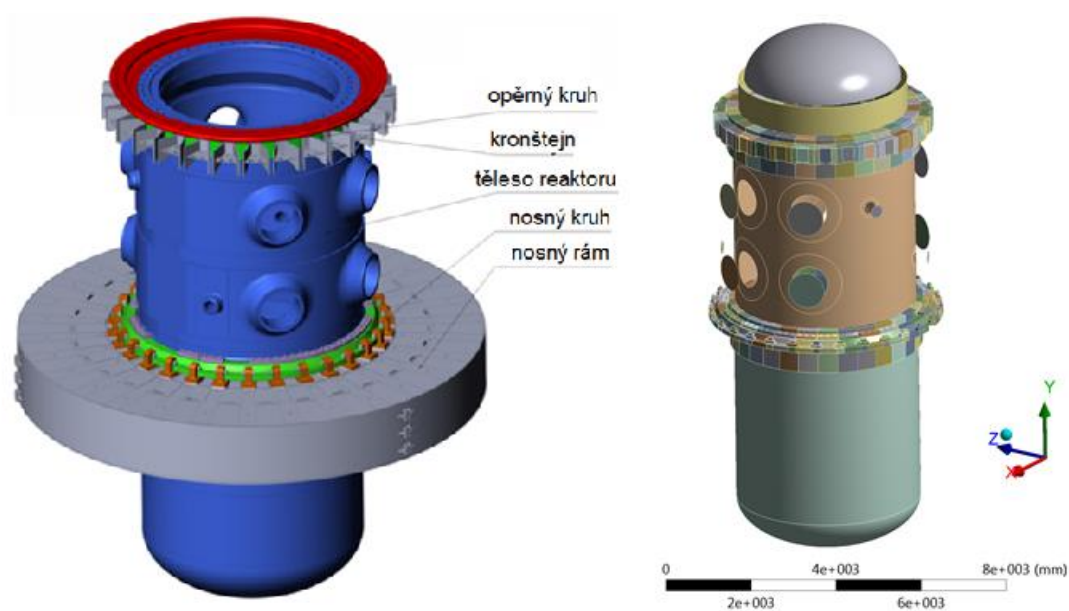
Vyhodnocení konstrukcí na odolnost proti poškození vysokocyklovou únavou bylo provedeno v souladu s kapitolou 10 normy [4]. Činností HCC vznikají tlakové pulsace chladiva, které působí na reaktor, který pak kmitá vůči svému uložení. Síly, které jsou přitom přenášeny pomocí OP na betonovou šachtu, mají periodický průběh. K výpočtu napětí je ve všech případech použit statický výpočet. Tento přístup je možný proto, že vstupy pro výpočet dynamického namáhání OP jsou formulovány jako síly působící na opěrný a nosný rám a zohledňují rezonanční jevy na úrovni sestavy tuhých těles a eventuální rezonanční kmitání jednotlivých OP není kvůli vysoké tuhosti OP uvažováno. K hodnocení byl použit přístup založený na Goodmanově-Haighově diagramu (GHD). Hodnotu meze vysokocyklové únavy při souměrném střídavém cyklu napětí, σ_C , předepisuje norma [4] v tab. 10.1. GHD dovoluje hodnotit únavu až do hodnoty předpětí na mezi pevnosti materiálu R_m . Amplituda redukovaného fiktivního napětí (σ_{aF}) je výsledkem již provedeného elastického výpočtu, při vibracích nesmí překročit hodnotu σ_A .

Závěr

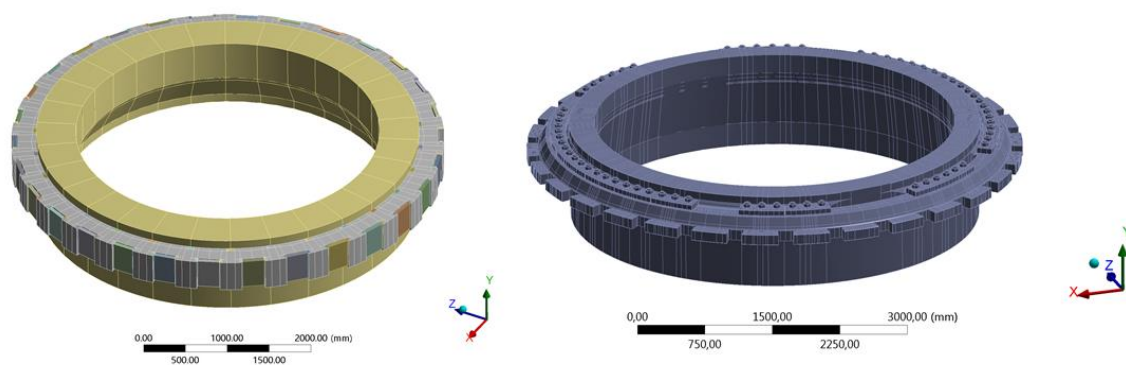
Provedené ověřovací výpočty potvrdily špičkovou profesionalitu odborníků, kteří se podíleli na konstrukčním návrhu a následné realizaci opěrných prvků tlakových nádob jaderně energetických zařízení. Všechny hodnocené prvky jsou vyhovující požadavkům Normativně technické dokumentace A.S.I. z hlediska statické pevnosti, nízkocyklové únavy i vysokocyklové únavy při vibracích. Výsledky provedených výpočtů lze využít při rozhodnutí o prodloužení životnosti jaderně energetických zařízení. Zároveň dokazují připravenost výpočtářských týmů řešit obdobné úkoly.

Literatura

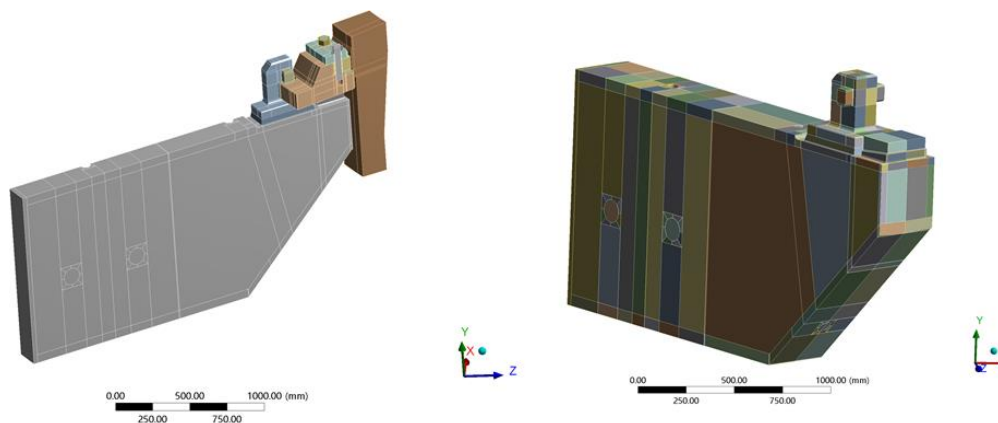
- [1] ANSYS® (2018): *Mechanical, Release 19.0*. Ansys Inc., Canonsburg (Pennsylvania, USA).
- [2] Kindelmann, P., Lazar, J., Hajžman, M., Červená, O., Polcar, P. (2018): *Model pro výpočtové hodnocení opěrných prvků JE Temelín*. Výzkumná zpráva, VYZ–VZ-36/18/009, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [3] Lazar, J., Šimeček, K., Hajžman, M., Polcar, P. (2018): *Hodnocení opěrných prvků ETE – průběžná zpráva za 1. etapu*. Výzkumná zpráva, VYZ–VZ-36/18/020, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [4] NDT A.S.I. (2016): *Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce III*. Normativně technická dokumentace A.S.I., NTD ASI-III-2016, Praha.
- [5] NDT A.S.I. (2016): *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, sekce II*. Normativně technická dokumentace A.S.I., NTD ASI-II-2016, Praha.



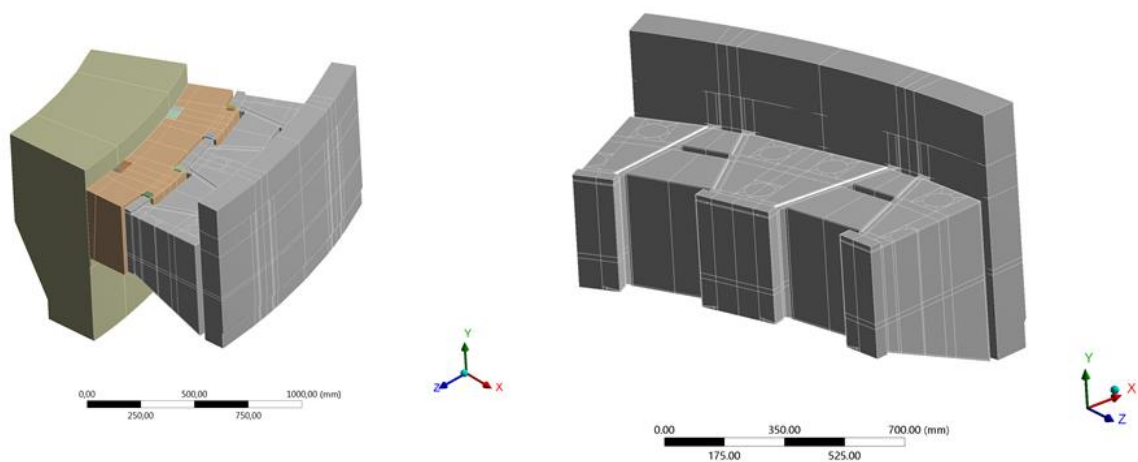
Obr. 1: Označení hlavních částí opěrných prvků tlakové nádoby reaktoru VVER-1000 a model pro výpočet přenosu sil



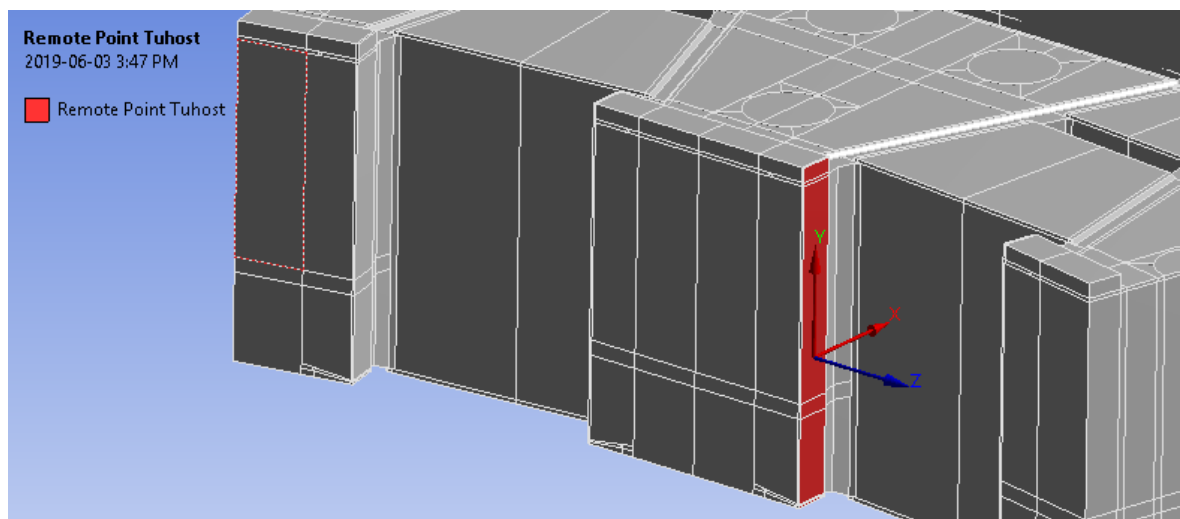
Obr. 2: Modely opěrného rámu a nosného kruhu



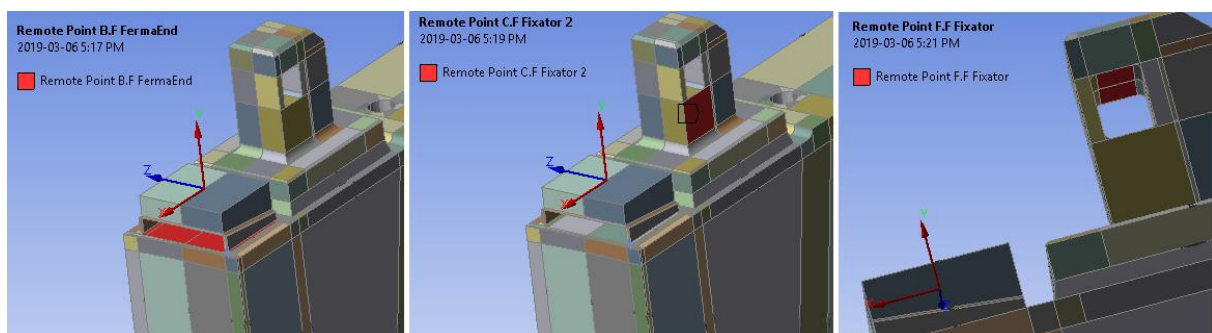
Obr. 3: Modely: sektor opěrného systému pro výpočet zatížení od teplot (vlevo) a sektor opěrného systému pro výpočet účinku od silového zatížení (vpravo)



Obr. 4: Modely: sektor opěrného rámu pro výpočet zatížení od teplot (vlevo) a sektor opěrného rámu pro výpočet mechanických účinků od silového zatížení (vpravo)



Obr. 5: Určení tuhosti opěrného rámu s vyznačením směru působení síly použité při výpočtu



Obr. 6: Určení tuhostí nosného rámu s vyznačením směrů působení sil použitých při výpočtu

NÍZKOTLAKÉ ČÁSTI PARNÍCH TURBÍN PŘI NEUSTÁLENÝCH PODMÍNKÁCH V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČR

LP PARTS OF STEAM TURBINES AT NONSTEADY CONDITIONS IN CZECH ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS

Miroslav J. Černý

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 16608 Praha 6

Abstrakt

Příspěvek se zabývá stavem v nízkotlaké části parní turbíny při neustálených podmínkách v přenosové soustavě ČR a jeho vlivem na životnost parních turbín.

Abstract

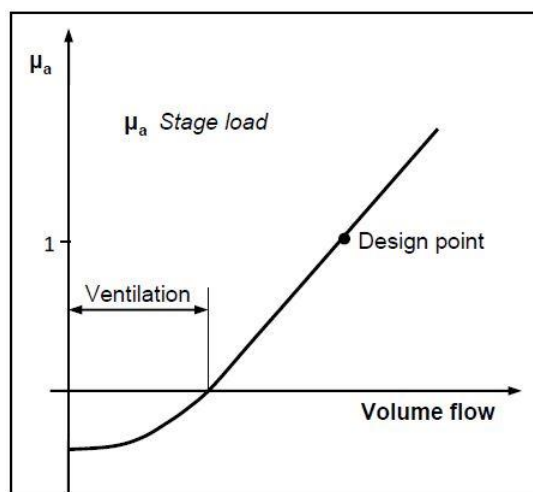
Paper deals with LP parts of steam turbines at nonsteady conditions in power transmission systems and the influence on the lifetime of steam turbines blades.

Úvod

Požadavky na provoz elektráren jsou do velké míry ovlivněny rychle vzrůstajícím podílem obnovitelných zdrojů, které jsou ze své podstaty nestabilní. To klade nové požadavky na provoz klasických zdrojů s parní turbínou, které se stále využívají i u obnovitelných zdrojů. To vede k situaci, kdy parní turbíny mohou pracovat s velmi nízkými objemovými průtoky po delší dobu. Za provozních podmínek, kdy objem průtoku v poslední fázi nízkotlaké části (LP) parní turbíny je pod určitou hranicí, energie se vrací do pracovního média. Tento proces způsobuje asynchronní aerodynamické excitace, které vedou k vysokému dynamickému zatížení lopatek. Tento proces se někdy nazývá ventilace, protože lopatky víří v globálně pomalém pohybu média s malými tlakovými rozdíly. Tento fenomén se také nazývá nízkoobjemový průtok (LVF).

Kritickou složkou parní turbíny z hlediska pružného provozu jsou zejména lopatky LSMB (Last Stage Moving Blades) v nízkotlaké části. Operační režim LSMB je charakterizován objemovým průtokem opouštějícím část turbíny.

Průtok se potom liší v důsledku snížení vstupní hmotnosti do LP (low pressure) stupně – části parní turbíny za nízkých zátěžových podmínek elektrárny. Také špatný kondenzační tlak vede ke snížení objemového průtoku.



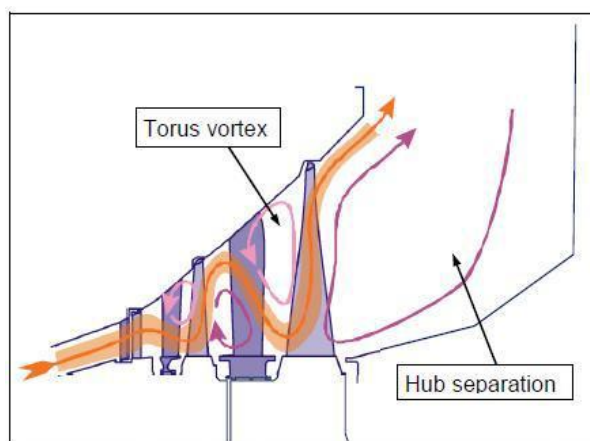
Obr. 1: Obecná charakteristika LP turbíny při změně objemového průtoku

Zatížení LP stupně (obr. 1) je bezrozměrný výstupní výkon turbínového stupně. Se snížením objemového průtoku se snižuje pracovní výkon a následně i výstupní výkon. V závislosti na skutečné geometrii turbíny již stupeň neprodukuje výkon obvykle kolem 20 % až 30 % toku výpočtového objemu. Další snížení objemového průtoku vede k energetické spotřebě stupně, kdy se energie vrací do pracovního média, nastává jev „ventilace“.

Objemové tokové pole uvnitř LP stupně

Bylo zjištěno, že struktura toku páry se mění se snížením objemového toku. Rozpětí variace reakce je 15 % u kořene lopatky a 65 % u špičky v poslední části parní turbíny. Vzhledem k tomu, že u kořene je úsek s nízkou reakcí, je ovlivněn nízkým objemovým tokem. Protože pára již nemůže projít zónou blízko kořene, je přesměrována směrem ke špičce lopatky a tím se za rotorovou lopatkou rozvíjí separační oblast.

Stejně jako separační oblast u náboje za rotorovou lopatkou se jiná separační zóna tvoří při ještě nižších objemových tocích blízkých prostoru v axiální mezeře mezi statorem a rotorovou lopatkou. Tento torusový vír se pohybuje obvodovým směrem se značnou rychlostí, která se blíží rotační rychlosti rotorové lopatky. Obě separační zóny a odstředivá síla usměrňují průtok u rotorové lopatky do diagonálního směru s hlavní radiální rychlostní složkou, jak je znázorněno na obr. 2. Nejvyšší teploty jsou měřeny na špičkách lopatek u vstupu k poslední řadě lopatek.



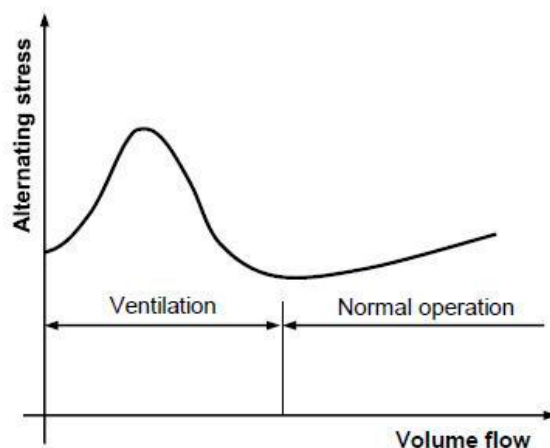
Obr. 2: Charakteristické proudění v LP stupni turbíny při nízkém objemovém plnění

Buzení lopatek

Proudění páry v separačních oblastech má za následek zvýšené dynamické zatížení lopatek v LP stupni parní turbíny při „ventilaci“. Reverzní přechodové toky vedou k přidavným dynamickým zatížením při ventilaci, což může vést až k porušení lopatek. Při provedených zkouškách byly lopatky v LP stupni monitorovány pomocí tenzometrů. Při provozu s nízkým objemovým tokem se napětí v lopatkách prudce zvyšovalo s hodnotami 2krát až 3krát vyššími, než jsou dynamická napětí za běžných podmínek (obr. 3).

V recenzované literatuře se objevují rozdílné výroky o provozních podmínkách s nejvyšším dynamickým zatížením lopatek.

Pokud je objemový průtok snižován, dynamické napětí neustále stoupá až do dosažení maxima téměř při nulovém průtoku (obr. 3). Buzení je popsáno jako náhodné, buzení v různých vibračních módech. Mechanismus způsobující buzení je však nejasný. Někteří autoři považují buzení lopatek LSMB za náhodné, obsahující všechny vlastní frekvence. Zdá se, že zdrojem buzení by mohla být separační zóna u kořene lopatek nebo zóna u pláště mezi statorem a rotorem.

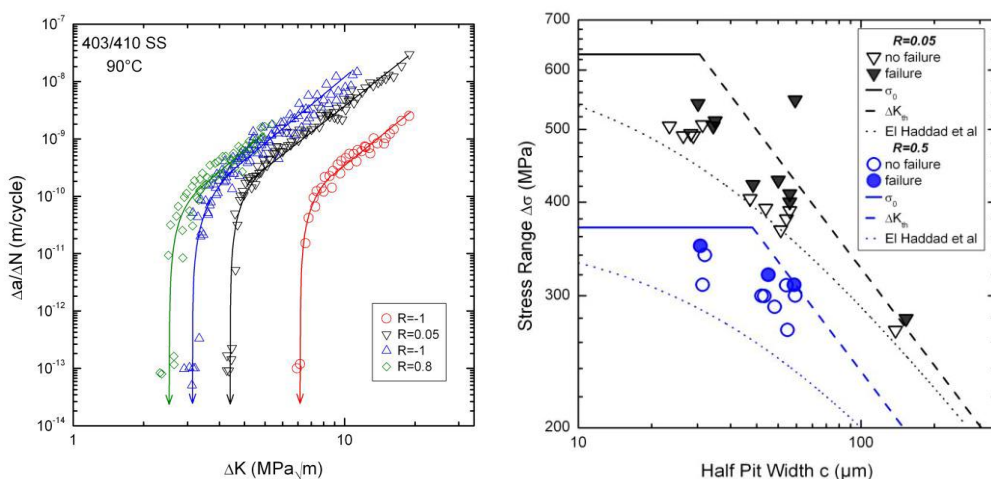


Obr. 3: Schéma alternujícího napětí na lopatce vs. objemový průtok páry

Jako nejpravděpodobnější příčiny jsou zmíněny nejisté podmínky zpětného toku. Druhou možností je buzení známé jako kompresní interakce mezní vrstvy. Třetí možnou příčinou je efekt, který je známým fenoménem u kompresorů, vyskytující se krátce před limitním tlakem. I když špičkový úsek LSMB funguje jako kompresor při ventilaci, uvádí se, že průtok rotorovými lopatkami je příliš radiální a má malou axiální složku.

Problémy životnosti lopatek parních turbín

U parních turbín je požadován kvalitní servis, přesná diagnóza, načasování oprav a zlepšování materiálů a provozu parních turbín. To vede k systematickému výzkumu iniciace a šíření trhlin, porušení a odhadu životnosti částí turbín, včetně lopatek za normálních podmínek a za resonance. Koncové lopatky LSMB turbíny přenášejí vysoké alternující napětí, expozici při zvýšených teplotách a mechanické síly při opakovaných poměrných deformacích cyklického zatížení. Lopatky také přenášejí obvodové (centrifugální) síly, které jsou v kombinaci s alternujícím napětím odpovědné za únavové poškození. Životnost nejvíce exponovaných (posledních L-1) lopatek je dána kombinací účinků sil, působících na lopatky parní turbíny a vlastností materiálu při daných korozních podmínkách.



Obr. 4: FCGR a Kitagawa-Takahashi Diagram

Korozní mechanismy, působící v parních turbínách je korozní únava (corrosion fatigue – CF), korozní praskání (stress corrosion cracking, SCC), důlková koroze (pitting) a eroze-koroze (erosion-corrosion) [1].

Důlková koroze a korozní únava lopatek turbín a koroze pod napětím (korozní praskání) jsou v současné době nejdůležitější problémy [2], [3].

SCC a CF poškození se inicializuje v nízkotlaké části parní turbíny ve vysoce lokalizovaných oblastech, obvykle v důlcích koroze jako koncentrátorech napětí. Stádia jsou: akumulované poškození metastabilních důlků na stabilní důlky, růst stabilních důlků, přechod důlků na trhliny, růst subkritických trhlin, a nakonec nestabilní porušení [4], [5], [6].

Kitagawa-Takahashi (K-T) diagram a FCGR (obr. 4) se obvykle používá pro odhad únavové meze a životnosti korodovaných částí lopatek parních turbín pro danou legovanou ocel, prostředí (pára, teplota) a způsob zatěžování. K-T diagram koreluje velikost korozního důlku s únavovou trhlinou [7], [8]. V poslední době byla též publikována teorie pravděpodobnostního K-T diagramu pro vyjádření vlivu geometrie koroze na únavu [9].

Příspěvek byl vytvořen v rámci grantového projektu TN01000007 Národní centrum pro energetiku.

Literatura

- [1] Černý, M. (2014): *Damage and Localized Corrosion in Steam Turbines*. Proceedings of 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis 2014, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Mariánské Lázně, CD-ROM. ISBN 978-80-231-0377-6
- [2] Černý, M. (2014): *Korozní poškození legovaných ocelí v parních turbínách*. Sborník 9. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 177-180. ISBN 978-80-261-406-3
- [3] Černý, M. (2015): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Proceedings of 53rd International Conference on Experimental Stress Analysis, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Český Krumlov, CD-ROM. ISBN 978-80-01-05735-1
- [4] Černý, M. (2016): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Applied Mechanics and Materials, Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines II, Vol. 827, pp. 177-180, 2016. ISSN 1662-7482
- [5] Černý, M. (2016): *Modeling of Corrosion Fatigue Crack Initiation in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proceedings of 54th International Conference Experimental Stress Analysis 2016, Czech Society for Mechanics, Srní, CD-ROM. ISBN 978-1-5108-2670-0
- [6] Černý, M. J. (2017): *Evaluation of the Influence of Corrosion Fatigue on Steel Alloy for Steam Turbines*. Proceedings of 55th International Conference Experimental Stress Analysis, Technical University of Kosice, Nový Smokovec (Slovakia), CD-ROM. ISBN 978-80-553-3166-9
- [7] Černý, M. (2017): *Posouzení korozní odolnosti dílů parních turbín s využitím lomové mechaniky*. Sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 149-150. ISBN 978-80-261-0741-5
- [8] Černý, M. J. (2018): *Životnost lopatek parních turbín*. Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 159-162. ISBN 978-80-261-0794-1
- [9] Černý, M. (2019): *Modelling of corrosion fatigue for steam turbines by probabilistic Kitagawa-Takahashi diagram*. Proceedings of 57th International Conference Experimental Stress Analysis, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Luhačovice, CD-ROM. ISBN 978-80-214-5753-9

VaV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI NEDESTRUKTIVNÍCH METOD A POVRCHOVÝCH ÚPRAV

R&D PROJECTS FOR NON-DESTRUCTIVE METHODS AND SURFACE TREATMENT

Jaroslav Brom, Pavel Mareš, Jana Veselá, Jan Patera, Roman Mohyla a Michal Chocholoušek

Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ)

Abstrakt

V článku jsou uvedeny informace o VaV projektech CVŘ řešených v rámci projektu národního centra pro energetiku, dílčího projektu DP6 „Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“, pracovního balíčku PB1.14 „Perspektivní diagnostické metody“, a dílčího projektu DP7 „Materiály a materiálové technologie pro moderní energetické aplikace“, pracovního balíčku PB1.15 „Povrchové úpravy komponent v JE a KE“. Jsou uvedeny popisy projektů, výstupy projektů a stávající stav.

Abstract

The article presents information on R&D projects of the Research Centre Rez developed within the project of National Centre for Energy, sub-project DP6 “Development of diagnostic methods for characterization of own energy components”, working package PB1.14 “Perspective diagnostic methods”, and sub-project DP7 “Materials and material technologies for modern energy applications”, work package PB1.15 “Surface treatment of components in NPP and FPP”. Project descriptions, project outputs and current status are presented.

1. PB1.14 „Perspektivní diagnostické metody“

Hlavním řešitelem pracovního balíčku PB1.14 je CVŘ.

1.1. Cíle PB1.14

Cílem VaV (výzkum a vývoj) v rámci tohoto pracovního balíčku je:

- Výzkum a vývoj metodiky pro validaci použití SW CIVA na simulování trhlin v materiálech z feritické a austenitické oceli.
- Výzkum a vývoj použití vysokoteplotního ultrazvukového zkoušení technikou phased array (HT PAUT) za provozních teplot do 350 °C.
- Výzkum a vývoj nelineární spektroskopie akustických vln (NEWS) a magnetické paměti materiálu (MMM) pro zkoušení materiálů z feritické a austenitické oceli.
- Výzkum a vývoj v oblasti použití Smart sensorů v energetice.

1.2. Přínosy PB1.14

- V možnosti používání SW CIVA ke zpřesnění stanovení rozměrů trhlin ve svarových spojích při reálných měřeních, při kvalifikování inspekčních postupů a pro trénink defektoskopických pracovníků.
- V detekování a měření velikosti trhlin pomocí HT PAUT za zvýšených teplot. To umožňuje např. zkrácení délky odstavek při realizaci zkoušení za zvýšených teplot při odstavování bloku nebo k možnosti monitorování stavu trhlin za provozu.
- V detekování indikací typu trhliny pomocí metody NEWS umožní v době odstavek zmonitorování velkého rozsahu potrubního systému nacházejícího se na komponentě mezi ultrazvukovými snímači. Následné nasazení metody MMM umožní vytipování problémových míst před provedením jejich kontrol objemovými nedestruktivními metodami.

- Ve stanovení požadavků na smart sensory a vyhodnocovací aparatury pro jednotlivé aplikace (jako např. měření vibrací, tepelné účinnosti, tloušťek apod.) a jednotlivé typy strojních zařízení (jako jsou např. rotační stroje, výměníky, potrubí apod.) a v možnosti použití bezdrátové diagnostiky komponent.

1.3. Popis podprojektu validace SW CIVA

Pomocí série zkušebních těles se známou konfigurací necelistvostí bude navržen a ověřen postup simulace UT v SW CIVA s vymezením podmínek pro validované použití tohoto SW.

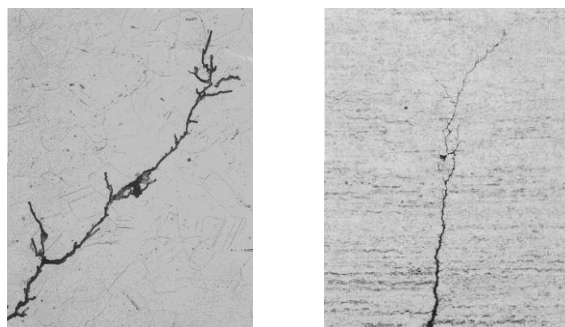
Na zkušebních tělesech z materiálu 12022.1 a X6CrNiTi18-10 s definovanými trhlinami budou realizována měření ultrazvukovou metodou technikou phased array (PAUT).

Následně proběhnou simulace nedestruktivního zkoušení, které budou probíhat přesně podle parametrů samotného zkoušení. Po provedení simulací budou porovnány výsledky měření PAUT a simulace. Srovnávat se bude zejména amplituda a tvary echo signálů od jednotlivých umělých vad.

Nakonec bude proveden opačný postup, kdy pomocí SW CIVA, s nastavením dle předchozích experimentů, bude provedena simulace trhlín na tělese s tloušťkou 12 mm a s tloušťkou 35 mm. Výstupem budou simulované výsledky NDT zkoušení, který se porovnají s reálným zkoušením. Rozdíl amplitud a tvar ech signálů se musí pohybovat v předem stanovených kritériích (tolerance odchylek budou definovány v rámci projektu).

Výstupy tohoto VaV podprojektu budou dva:

- ověřená technologie – validace SW CIVA,
- užitný vzor zkušebních těles s trhlinou vyrobených drátořezem.



Obr. 1: Vzory trhlín pro výrobu defektů ve zkušebních tělesech pro validaci SW CIVA



Obr. 2: Příklad trhlíny v tělese vyrobené drátořezem

1.4. Popis podprojektu vysokoteplotního PAUT (HT PAUT)

V první fázi proběhne kalibrace citlivosti a rychlosti šíření zvuku vybrané PA sondy na měřkách pro daný typ materiálu 12022.1 a X6CrNiTi18-10. Vstupní měření vždy bude provedeno za pokojové teploty a následně bude opakovaně prováděno při teplotách mezi 100 °C až 350 °C na obou materiálech měrek.

V druhé fázi bude provedeno měření k ověření detekovatelnosti vrubů EDM (Electrical Discharge Machining) v základních materiálech 12022.1 a X6CrNiTi18-10 při teplotách shodných s teplotami kalibrace na měrkách. V případě detekce vrubů bude provedeno vyhodnocení získaných indikací, stanovení rozměrů s ohledem na zkušební teplotu. Měření bude probíhat pro oba typy materiálů a pro různé rozměry vrubů EDM.

Ve třetí fázi bude provedeno měření v rozsahu fáze 2 v oblasti svarového spoje pro detekci a určení rozměrů vrubů EDM.

Součástí výstupu je zpráva popisující průběh ověřování technologie HT PAUT pro teploty dosahujících maxima 350 °C, pro materiály 12022.1 a X6CrNiTi18-10.

Průkazem ověřené technologie budou inspekční postupy pro zkoušení materiálů 12022.1 a X6CrNiTi18-10 technikou HT PAUT.

1.5. Popis podprojektu NEWS a MMM

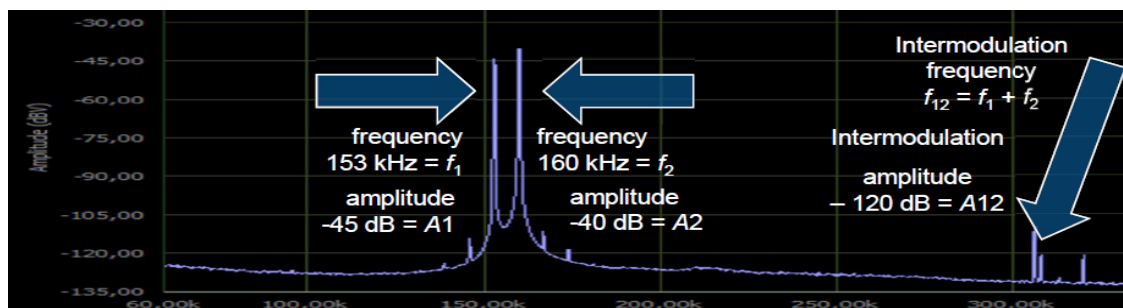
Vývoj ověření technik NEWS a metody MMM pro zkoušení svarových spojů proběhne v následujících krocích:

- měření na zkušebních tělesech bez svarového spoje,
- měření na zkušebních tělesech se svarovým spojem bez trhliny,
- detekce a stanovení rozměrů as-real trhliny jinými NDT metodami (zejména PAUT),
- měření nelineární odezvy na zkušebních tělesech se svarovým spojem s trhlinou – detekce as-real defektů,
- měření na zkušebních tělesech, která vzniknou svařením zkušebních těles pro lepší simulaci trasy potrubí (větší délka zkušebních těles),
- měření bez a se zatížením v místě defektu,
- měření bez a přes izolaci (pouze MMM),
- na 1 ks zkušebního tělesa bude ověřován vliv magnetizace na výsledky měření metodou MMM.

Výstupem podprojektů NEWS a MMM budou ověřené technologie zkoušení svarových spojů technikami NEWS a metodou MMM.

V podprojektu NEWS budou zkoušeny následující techniky:

- NWMS (metoda dvoufrekvenčního směšování – míchání dvou různých budících signálů o frekvencích f_1 a f_2 uvnitř zkoušeného materiálu),
- NRUS (nelineární rezonanční metoda – měření frekvenčních charakteristik vzorku v určitém frekvenčním intervalu při zvyšující úrovni budícího signálu),
- SSM (metody vyslání dvou pulzů, jednoho o nízké amplitudě, který je považován za lineární, a druhého o vysoké amplitudě, který je považován za nelineární).



Obr. 3: Obrázek demonstrující principy NWMS techniky



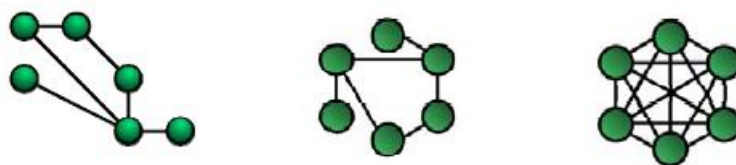
Obr. 4: Obrázek demonstrující principy NRUS techniky (úroveň budícího signálu 40–400 V)

1.6. Popis podprojektu Smart sensory

Tento podprojekt je aplikovaným výzkumem využití zkušeností EPRI – jejich transfer na podmínky českých KE a JE.

Výstupem tohoto podprojektu bude dokumentace „Vytvoření standardu pro používání Smart sensorů v ČEZ za účelem diagnostikování stavu vybraných strojních typů“.

V rámci tohoto podprojektu bude dále provedeno pro komunikační protokol WirelesHart vyzkoušení 2 typů bezdrátových smart sensorů (měření vibrací a teplot) a adaptéru na přenos dat signálu 4-20 mA. Pro otestování kompatibility komunikačního protokolu WirelesHart budou voleny Smart sensory a zařízení gateway od různých výrobců. Bude zkoušen vliv technologických překážek na funkčnost přenosů. Vyzkoušení proběhne nejdříve na zařízení CVŘ, následně v technologii partnera projektu (na pilotní uhelné elektrárně ČEZ). Data budou ukládána na počítač (OPC server) ve formátu dohodnutém s partnerem projektu, aby je následně šlo přenášet a využívat v databázích partnera projektu.



Obr. 5: Příklady topologie typu Mesh, která bude zkoušena

2. PB1.15 „Povrchové úpravy komponent v JE a KE“

Hlavním řešitelem PB1.15 je VZÚ Plzeň, CVŘ řeší dílčí činnosti. Níže jsou diskutovány činnosti CVŘ.

2.1. Cíle a přínosy PB1.15

Cílem pracovního balíčku je vývoj a testování povrchových úprav kritických komponent elektráren (jaderných, klasických, vodních), nanášených pomocí technologií žárového nástřiku. Projekt bude zaměřen na ověření potenciálu využití metody nástřiku plamenem, elektrickým obloukem, plazmatem a zejména pomocí technologie Cold Spray (CS). Hlavním cílem projektu je návrh a výběr vhodné technologie nástřiku a materiálu povlaku pro opravy konkrétních komponent. Dalším cílem dílčího projektu je zmapování využitelnosti chybějících postupů a technologií nedostupných v ČR – zejména technologie tzv. studeného nástřiku – Cold Spray. Součástí řešení dílčího projektu budou vyvíjeny a ověřovány pokročilé metodiky NDT pro provádění periodických kontrol takto stříkaných komponent.

Přínosem dílčího projektu bude, kromě samotného návrhu oprav konkrétních aplikací, i prohloubení porozumění spoluřešitelů a komerčního partnera v oblasti technologií žárových a studených nástřiků, které může být uplatněno i v jiných než v projektu navrhovaných aplikacích.

2.2. Program vývoje metodiky nedestruktivního zkoušení nástřiků CS

Cíle nedestruktivního zkoušení jsou uvedeny v pořadí:

měření tloušťky nástřiku – vnitřní a vnější nástřik.

měření přilnutí nástřiku k substrátu – vnitřní a vnější nástřik.

vnitřní nástřik – detekce defektů vycházejících z nástřiku do substrátu, detekce z vnějšího povrchu.

vnější nástřik – detekce a stanovení rozměrů defektů v substrátu komunikujících s jeho vnitřním povrchem, detekce z vnějšího povrchu.

Vývoj bude prováděn při použití nedestruktivní metody ultrazvukového zkoušení:

- a) Konvenční UT impulsní technikou s využitím přímé sondy příčných vln o vysoké frekvenci – bude aplikováno pro cíle 1) a 2).
- b) Technika Phased Array (PAUT) s využitím PA úhlových sond – bude aplikováno pro cíle 3) a 4).

Výstupem výše uvedeného vývoje bude návrh inspekčního postupu nedestruktivního zkoušení povlaků CS.

2.3. Popis programu vývoje metodiky na mechanické zkoušení trubkových polotovarů s povlaky

VaV metodiky hodnocení mechanických vlastností materiálu ze vzorků z trubkových polotovarů v porovnání se vzorky zhotovenými dle vybraných norem proběhne na vzorcích vyrobených z trubek z materiálu 1.4541 o rozměrech 219,1 x 12,5 mm, 114,3 x 4,5 mm a 125 x 14 mm.

Z naměřených závislostí napětí-deformace bude možné vyhodnotit vliv povlaku na pevnost dvojice substrát-povlak. Vzhledem k různé tloušťce použitých trubek a stejné tloušťce vrstvy bude možné vyhodnotit vliv poměru materiálů substrátu a povlaku a porovnat s hodnotami základních materiálů substrátu a povlaku. Na základě průběhů napětí-deformace budou hledány korelace v oblasti do $R_{p0,2}$ nebo R_m substrátu. Na vybraných tělesech bude provedena po zkoušce tahem metalografická analýza zaměřená především na rozhraní substrát-povlak.



Obr. 6: Polotovary s přípravkem připravené pro zhotovení povlaku technologií CS

2.4. Popis programu pro zjištění mechanických vlastností a metalografie pro substrát z materiálu 22K a 08CH18N10T a povlak zhotovený technologií Cold Spray

- 1) Nejdříve proběhnou zkoušky tahem základního materiálu dle ČSN EN ISO 6892-1 a 2 při pokojové teplotě a teplotě 350 °C na kruhových tělesech o průměru 6 mm.
- 2) Následně budou provedeny zkoušky na kruhových tělesech o průměru 4 mm s povlakem CS o tloušťce 1 mm v následujícím rozsahu.
 - Zkoušky tahem dle EN ISO 6892-1 za pokojové teploty na tělesech bez a s tepelným zpracováním.
 - Zkoušky tahem dle EN ISO 6892-2 při teplotě 350 °C na tělesech bez a s tepelným zpracováním.

- Metalografické analýzy systému substrát-povlak. Tyto analýzy se budou provádět po deformačních zkouškách. Metalografické analýzy budou zahrnovat fraktografii lomových ploch a hodnocení adheze a přilnavosti vrstvy k substrátu po vnesení deformace. K těmto analýzám bude používána elektronová a světelná mikroskopie.
- 3) Pro porovnání výše uvedených výsledků s mechanickými vlastnostmi samotného materiálu povlaku CS bude na plochých tělesech z materiálu povlaku CS proveden obdobný rozsah zkoušek uvedený v bodech 1 a 2.

Výstupem bude technická zpráva sumarizující a analyzující změřené výsledky.

2.5. Popis programu zjištění „zatékavosti“ povlaku zhotoveného technologií Cold Spray

Pro hodnocení „zatékavosti“ budou použita trubková tělesa s jedním „V“ vrubem a třemi vývrty o průměrech 1, 2 a 3 mm. Tělesa budou vytvořena z trubek vyříznutých z potrubí technické vody nedůležité na JE Temelín. Nástřik s tloušťkou 1 mm bude proveden kolmo a pod úhlem 45° a ze dvou různých vzdáleností.

Výstupem bude zpráva z metalografických analýz s hodnocením schopnosti povlaku CS penetrovat do umělých vad.



Obr. 7: Těleso pro zkoušení „zatékavosti“ povlaku zhotoveného technologií CS

2.6. Popis programu na ověřování korozní odolnosti povlaků pomocí potenciometrických zkoušek

Elektrochemické zkoušky korozní odolnosti povlaku a substrátu mají za úkol hodnotit schopnost odolávat degradaci ve vodném prostředí. Pro hodnocení korozní odolnosti bude použit záznam potenciodynamických křivek v rozsahu od korozního potenciálu do transpasivní oblasti. Jako korozní prostředí bude použit vodný roztok NaCl o koncentraci 35 ppm. Po elektrochemickém měření bude zdokumentován stav povrchu pomocí světelného mikroskopu.

Hlavním výstupem měření korozní odolnosti bude záznam potenciodynamických křivek jednotlivých vzorků a hodnota korozního potenciálu, ze kterých lze určit rozsah korozní odolnosti povlaku a přibližný korozní úbytek materiálu.

3. Závěr

Výše uvedené VaV aktivity byly zahájeny v 04/2019. Do dnešní doby proběhlo zpřesnění jednotlivých podprojektů, probíhá výroba polotovarů a zkušebních těles. Výstupy budou sloužit partnerovi projektu (ČEZ, a. s.) a budou základem pro případné navazující projekty v rámci národního centra pro energetiku.

Presentovaný článek byl finančně podpořen Technologickou agenturou České republiky – projekt TN01000007/Národní centrum pro energetiku.

VaV PROJEKT: OPTIMALIZACE KOROZNÍCH JEVŮ V ROZVODECH A CHEMICKÁ STABILIZACE VOD CHLADÍCÍCH OKRUHŮ JE DUKOVANY

R&D PROJECT: THE OPTIMALIZATION OF CORROSION PROCESSES IN THE SYSTEMS AND WATER CHEMISTRY STABILIZATION OF COOLING WATER SYSTEMS IN NPP DUKOVANY

Alena Kobzová ^{a)}, Helena Číhalová ^{a)}, Tereza Šobová ^{a)}, Dalibor Kárník ^{a)}, Martin Skala ^{b)}, Pavel Kůs ^{b)} a Jakub Vyvadil ^{c)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, tel.: +420 266 173 236, e-mail: Alena.Kobzova@ujv.cz

^{b)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{c)} Energoprojekt Praha – divize ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Cílem VaV projektu je analytické zpracování chemicko-technologických východisek pro dávkování činidel do doplňované přídavné vody, popř. do specifických míst propojených chladících okruhů na EDU za účelem snížení korozních jevů v potrubních rozvodech TVD a chemické stabilizace cirkulačních chladících vod, které umožní provozovat terciální okruh bez omezení v průběhu celého roku. Cílem tohoto příspěvku je shrnutí celého průběhu projektu a jeho výsledky.

Abstract

The aim of this R&D project was an analytical treatment of chemical-technologist bases for agent sampling to open cooling water systems which is interconnected with essential service water systems in NPP Dukovany. The objectives are reduction of corrosion in piping of essential service water system and chemical stabilization of open cooling water system, which allow operating the open cooling water system without restriction during the whole year. This article describes the whole project and its results.

Úvod

Realizace náplně projektu zahrnovala tvorbu technického konceptu úpravy chemického režimu okruhů technických vod důležitých (TVD) a cirkulačních chladících vod (CChV) včetně stanovení a zdůvodnění změn projektových podmínek, tj. zpracování dokumentace v úrovni Koncepční projekt zařízení EDU. V rámci řešení tohoto konceptu byly hodnoceny:

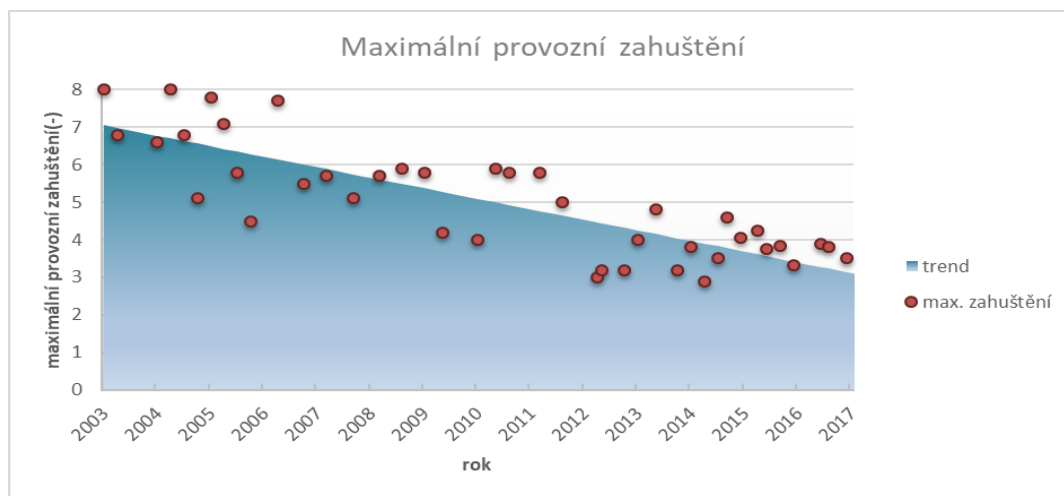
- Metody stabilizace CChV a jejich kombinace s možnostmi omezení mikrobiálního oživení v okruhu TVD včetně řešení možných dávkovacích činidel.
- Návrh dávkovacích a měřicích míst včetně identifikace případných všeprofesních (tj. strojní, stavební, MaR a elektro) dopadů.
- Definování finálních požadavků na změnu chemického režimu včetně stanovení počátečních řídicích a mezních kritérií.

Dalším výstupem projektu tvorba dodatku k normativně technickému dokumentu pro řízení chemických režimů terciálního okruhu v EDU zohledňující finální optimální řešení.

Etapa 1: Zhodnocení metod stabilizace cirkulační chladící vody a hodnocení ekotoxicity přípravků [1]

Vlivem hydrologických poměrů ve vodních dílech Mohelno a Dalešice, klimatického vývoje a odběrem surové vody pro cirkulační chladící okruh (CChO) dochází k zakonzertování rozpuštěných látek ve zdroji surové vody, a to má nepříznivý dopad na hodnotu maximálního provozního zahuštění CChO. Vývoj maximálního provozního zahuštění je uveden na obr. 1. Z kle-

sajícího trendu je patrné, že je třeba přistoupit k zavedení nového technologického kroku – stabilizovat CChV.



Obr. 1: Vývoj maximálního provozního zahuštění v letech 2003-2017 CChO na EDU

V rámci etapy 1 byla vypracována rešerše o možnostech stabilizace CChV. Teoreticky byly posouzeny dostupné a doporučované způsoby ošetření chladicí vody. Na základě rešerše, diskuze s dodavateli komerčních přípravků pro úpravu vody, složení odpadní vody byla vybrána metoda založená na snižování obsahu hydrogenuhlíkatových aniontů – dávkování bezfosfátového stabilizátoru tvrdosti.

Používání komerčně dodávaného přípravku pro kondicionaci CChV na EDU musí předcházet povolení jeho užívání na Povodí Moravy. Podklady pro povolení používání takového přípravku musí obsahovat mj. výsledky testů ekotoxicity a hodnocení dopadu na daný vodní útvar. Nad rámec informací poskytnutých v bezpečnostních listech byl pro účely zhodnocení vlivu přípravků na životní prostředí v okolí EDU sestaven komplexní test skládající se z několika zkoušek. Jednotlivé zkoušky ekotoxicity byly voleny tak, aby co nejlépe postihly lokální situaci v okolí EDU – vodní tok Skryjský potok. Cílem komplexního testu ekotoxicity nebylo určit hodnoty jako LC50, EC50 nebo ErC50 ale posoudit, zda v koncentracích doporučených výrobcem nevykazují přípravky toxické vlastnosti. Testy ekotoxicity vybraných přípravků neprokázaly závadnost pro dané užití včetně testu inhibice pohyblivosti *Daphnia* sp.

Jedním z výstupů etapy bylo vytvoření podkladů pro potřeby vyjednávání zástupců EDU s Povodím Moravy.

Etapa 2: Návrh dávkovacích a měřících míst [2]

Předmětem plnění etapy 2 bylo vypracování návrhu konkrétního použití doporučené metodiky v Etapě 1 na EDU, tj. určení vhodného místa pro dávkování chemikálií, vhodného místa pro odběr vzorků chladicí vody. Byla vytipována dvě možná místa dávkování – do surové vody a do chladicího okruhu. Doporučeno bylo dávkování do přídavné vody, které bude umístěno v objektu ÚCHV, odkud bude zaručena distribuce pro oba HVB. Dávkování se skládá z dávkovacích čerpadel a ze zásobních nádrží dávkovaného přípravku.

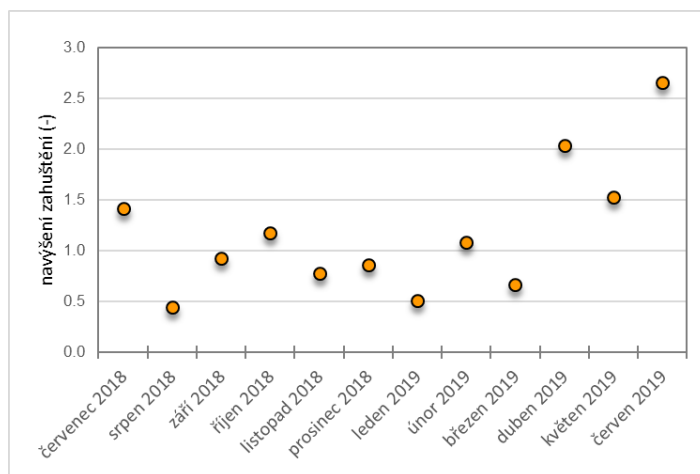
Odběrová místa z chladicí vody jsou doporučena umístit na výtlaku BQDV v objektu ČČS I a II. Současné byly řešeny návaznosti na další profese jako je elektro, zajištění komunikace mezi dávkovací stanicí a analyzátozem či případné stavební úpravy.

Etapa 3: Ověření funkce činidel pro stabilizaci CChV [3]

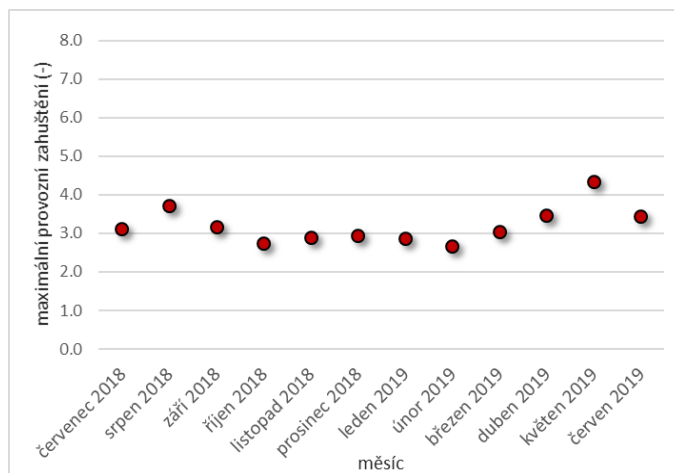
Vliv vybraného přípravku na SV používanou v EDU byl ověřen sadou zahušťovacích testů provedených od června 2018 do července 2019. Zahušťovací testy byly doplněny o podrobnou chemickou analýzu.

Na základě provozních parametrů a průměrného složení SV z roku 2017 byla dodavatelem určena doporučená dávka přípravku. V rámci Etapy 1 tohoto projektu byl každý měsíc od června 2018 do července 2019 proveden zahušťovací test s čerstvě odebranou SV a doporučenou dávkou kondicionačního činidla. Požadavkem bylo navýšit zahuštění dané vody o jeden stupeň. Na obr. 2 jsou výsledná navýšení zahuštění. Z tohoto výsledku vyplývá, že nelze spočítat doporučenou dávku, která bude splňovat požadavky během celého roku, protože kvalita SV se mění jak z hlediska krátkodobého v řádu měsíců (obr. 3), tak z hlediska dlouhodobého v řádu let (obr. 1). K dosažení požadovaného výsledku je tak nutné kvalitu SV pravidelně sledovat a přípravek dávkovat podle potřeby.

Podrobné chemické analýzy shodně prokázaly proměnlivost vstupní SV v průběhu roku. Dále také potvrdily, že přípravek má ze všech analyzovaných složek vliv pouze na koncentraci vápníku. Přípravek udržuje vápník v roztoku v rozpuštěné formě a tím zabraňuje vypadávání a usazování pevného uhličitanu vápenatého.



Obr. 2: Navýšení zahuštění po přidání doporučené dávky kondicionačního činidla



Obr. 3: Proměnlivost kvality SV z hlediska maximálního provozního zahuštění v průběhu jednoho roku

Etapa 4: Ověření dopadů dávkování na zařízení [4]

Kondicionační přípravek spolu se SV bude procházet systémem TVD. Tento systém zabezpečuje chlazení přístrojů a zařízení, která jsou důležitá z hlediska jaderné bezpečnosti. V rámci Etapy 4 tohoto projektu byl proveden expoziční test. Ten potvrdil, že vybraný přípravek nemá z korozního hlediska negativní vliv na žádný z materiálů použitých v systému TVD.

V době, kdy je přípravek dávkován do SV může dojít ke skokovému krátkodobému zakoncentrování přípravku v systému TVD. Expoziční test z Etapy 4 však prokázal, že přípravek nemá negativní vliv ani v případě jeho vyšší koncentrace.

Testovány byly následující materiály: uhlíková ocel 11 370, korozivzdorná ocel 08Ch18N10T a těsnicí materiál Novapress Univerzal SV100.

Jednalo se o statický test, kdy byly jednotlivé vzorky umístěny do kádinek s modelovou TVD, s modelovou TVD s přídatkem doporučené dávky kondicionálního činidla a s modelovou TVD s přídatkem dvojnásobné doporučené dávky kondicionálního činidla. Kádinky byly po celou dobu experimentu uchovávány v boxu při zvýšené teplotě (60 °C). Experiment trval 183 dní.

Po ukončení experimentu byla analýza korozních úbytků u vzorků uhlíkové oceli provedena gravimetricky. U oceli 08Ch18N10T byly pro experiment použity předepnuté vzorky (U-bend), které byly po experimentu analyzovány scanovacím elektronovým mikroskopem (SEM) a byla na nich provedena kapilární zkouška pro indikaci korozního praskání. Vzorky těsnicího materiálu byly analyzovány vizuálně.

Etapu 5: Vytvoření normativně technického dokumentu

V závěrečné etapě byly shrnuty výsledky celého projektu v nově vytvořeném dodatku k technicko-normativnímu dokumentu pro řízení chemického režimu okruhu technických vod a okruhů chladicích vod EDU. V rámci tohoto dodatku byla popsána vhodná řešení stabilizace CChV na EDU, určena dávkovací a měřicí místa, popsáno dávkování a měření přípravku v CChO a popsány veškeré skutečnosti potřebné pro implementaci dávkování na EDU.

Závěr

V současné době je již schválené použití vybraného kondicionálního přípravku, jak Povořím Moravy, tak Odborem životního prostředí a zemědělství Krajského úřadu kraje Vysočina a probíhá finalizace zadávací dokumentace pro realizaci projektu, která by měla být dokončena do konce roku 2019. Na počátku roku 2020 by měla být započata realizace, jejíž dokončení je plánováno do konce června 2020.

Literatura

- [1] Kobzová, A., Suchanová, H., Skala, M., Kůs, P. (2018): *Optimalizace korozních jevů v rozvodech a chemická stabilizace vod chladicích okruhů EDU, Etapa 1: Zhodnocení metod stabilizace CChV a hodnocení ekotoxicity přípravků*. Technická zpráva, DITI2302/573, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [2] Vyvadil, J., Černý, P., Švarc, V. (2018): *Optimalizace korozních jevů v rozvodech a chemická stabilizace vod chladicích okruhů EDU, Etapa 2: Určení vhodného místa pro dávkování a odběr CChV*. Technická zpráva, EGP 5071-F-180938, ÚJV Řež, a. s., Praha.
- [3] Číhalová, H., Kobzová, A., Kárník, D., Šobová, T. (2018): *Optimalizace korozních jevů v rozvodech a chemická stabilizace vod chladicích okruhů EDU, Etapa 3: Ověření funkce činidel pro stabilizaci CChV*. Technická zpráva, DITI2302/625, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [4] Šobová, T., Kobzová, A., Kárník, D., Číhalová, H. (2018): *Optimalizace korozních jevů v rozvodech a chemická stabilizace vod chladicích okruhů EDU, Etapa 4: Ověření dopadů dávkování na zařízení*. Technická zpráva, DITI2302/623, ÚJV Řež, a. s., Řež.

VYBRANÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PROJEKTU CESEN

SELECTED RESULTS OF THE CESEN PROJECT SOLVING

Pavel Polach ^{a)}, Šárka Houdková ^{a)} a Michal Hajžman ^{b)}

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

^{b)} Západočeská univerzita v Plzni, NTIS, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Abstrakt

V příspěvku jsou stručně představeny dva vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (akronym CESEN) dosažené v roce 2018: porovnání vlastností žárových nástržíků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrací lopatek parních turbín.

Abstract

The paper presents in brief two selected results of the Competence Centre Project of the Technology Agency of the Czech Republic “Centre of research and experimental development of reliable energy production” (CESEN acronym) achieved in 2018: comparison of properties of thermally-sprayed coatings with other types of surface treatment of power producing equipment parts and advanced numerical solution of steam turbines blade vibration.

Úvod

Řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1] (akronym CESEN; projekt v rámci programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky) bylo zahájeno v roce 2012 a bude dokončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu je přispět prostřednictvím aplikací výsledků výzkumu a vývoje nových technologií a materiálů ke dlouhodobému zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie.

Řešitelskými pracovišti jsou Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (příjemce projektu), ČEZ, a. s., Doosan Škoda Power s.r.o., Západočeská univerzita v Plzni, České vysoké učení technické v Praze, MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., TES s.r.o. a ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov. Aktualizovaná odborná náplň řešení projektu byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v roce 2016 [2]. Vybrané výsledky řešení projektu dosažené v letech 2016 a 2017 byly prezentovány v následujících ročnících této konference [3], [4].

V roce 2018 bylo dosaženo při řešení projektu celkem 11 odborných výsledků:

- software pro řešení vibrací perturbovaných olopatkovaných disků a turbogenerátorů s Lafoonovými zářezy,
- software pro tvorbu celkového matematického modelu turbosoustrojí včetně perturbovaných olopatkovaných disků, rotorových čepů, ucpávek, ložisek, lože a turbogenerátorů s vinutím, certifikovaná metodika pro určování základních mechanických vlastností vybraných materiálů z výsledků penetračních testů při použití neuronových sítí,
- metodika pro analýzu proudění a přenosu tepla v úzkých kanálech turbínových komponent a v ucpávkách,
- metodika termografického měření meze únavy materiálu,
- matematické modely vybraných točivých strojů pro systém včasného varování (EWS/CBM) v elektrárnách,
- metodika pro optimální rozhodování o opravách a výměnách komponent energetických zařízení,
- optimalizace provozu centrálního úložiště technologických dat ČEZ, a. s.,

porovnání výsledků hodnocení žárovevnosti stejných materiálů klasickou metodou, metodou zrychlených creepů (ACT) a metodou malých vzorků (SPCT),
porovnání vlastností žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení,
shrnutí poznatků o termografických metodách a o možnostech jejich využití pro diagnostiku energetických zařízení.

V tomto příspěvku jsou stručně představeny dva výsledky řešení projektu: porovnání vlastností vybraných žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrací lopatek parních turbín.

Porovnání vlastností vybraných žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení

V rámci řešení projektu bylo provedeno vzájemné porovnání vlastností vybraných žárově stříkaných povlaků deponovaných pomocí technologie HP/HVOF s konkurenčními technologiemi povrchových ochran. Materiály povlaků byly zvoleny (na základě předchozích zkušeností) s ohledem na jejich potenciál odolávat mechanickému namáhání za vysokých teplot a v korozně agresivním prostředí.

V porovnávací studii [5] jsou hodnoceny materiály povlaků na bázi karbidu chromu s různými typy matrice: Cr_3C_2 -25%NiCr, Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY, Cr_3C_2 -50%NiCrMoNb, povlaky na bázi superslitin Co a Ni: Stellite 6, Hastelloy C-276, NiCrBSi, CoCrAlYTCSi a experimentální materiál na bázi karbonitridu titanu: (Ti,Mo)(C,N)-27%Ni. Nástřikové parametry pro jednotlivé materiály byly optimalizovány na základě hodnocení mikrostruktury, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v předchozích etapách řešení projektu. Pro přípravu vzorků hodnocení mechanických vlastností a korozní odolnosti byly použity parametry vedoucí k nástřiku s nejlepšími sledovanými vlastnostmi.

Jako alternativní povrchová úprava byly zvoleny laserový návar Stellite 6, dva typy nitridovaných povrchů oceli X22 (s TiH a bez TiH) a PVD vrstvy TiAlN, ZrBCSi a HFBSiC.

Mikrotvrdot žárovo stříkaných povlaků byla hodnocena na příčném řezu povlakem při zatížení 300 gramů, přibližně ve středu povlaku paralelně s rozhraním. Na každém řezu byly provedeno minimálně 7 vtisků; byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Mikrotvrdot laserového návaru Stellite 6 byla měřena na příčném řezu povlakem. Byl hodnocen hloubkový profil tvrdosti ve dvou různých místech. Jako výsledná hodnota tvrdosti byl použit aritmetický průměr hodnot HV 0.3, měřených v materiálu povlaku bez ovlivnění substrátem. HV 0.3 bylo stanoveno z celkem 14 měření. Hodnocení abrazivní odolnosti bylo provedeno pomocí testu ASTM G-65. Pro každý povlak byly provedeny dva testy. Rychlost opotřebení [mm^3/m] byla stanovena pomocí změřeného hmotnostního úbytku a naměřených hodnot měrné hustoty. Mechanismus opotřebení byl hodnocen pomocí elektronové mikroskopie. Podmínky testu jsou podrobně popsány ve výzkumné zprávě [6]. Kluzné vlastnosti byly hodnoceny na základě výsledků testu dle ASTM G-133 (oscilační vratný pohyb ocelové kuličky proti obroušenému povrchu povlaku). Při testu byl snímán koeficient tření. Na závěr byla, na základě stanovení profilu stopy po opotřebení a určení objemového úbytku, hodnocena odolnost povlaku proti opotřebení [$\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$].

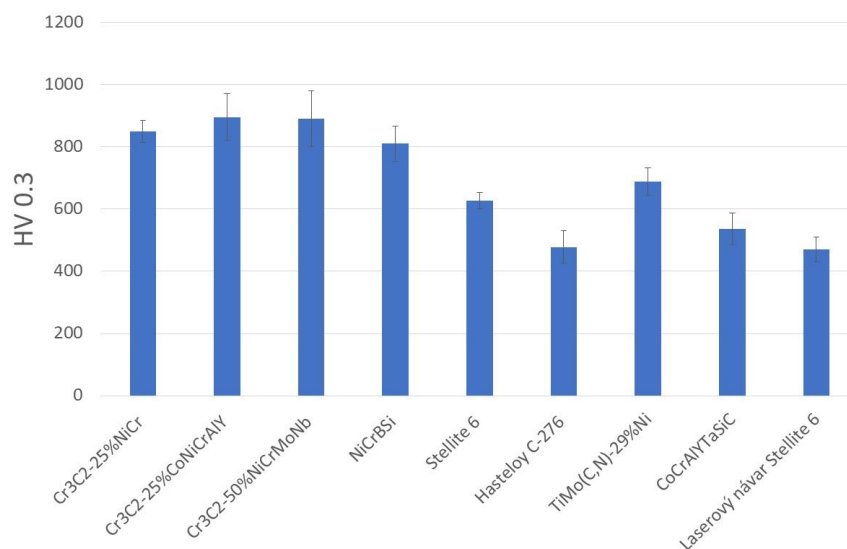
Odolnost proti vysokoteplotní korozi a proti spalinám byla hodnocena na vybraných HVOF stříkaných povlacích a na laserovém návaru Stellite 6. Jako korozní médium byla použita sůl o chemickém složení 18% Na_2SO_4 82% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Metodika testování je podrobně popsána ve výzkumné zprávě [7].

Erozní odolnost povlaků a alternativních povrchových úprav (nitridace, PVD povlak) byla hodnocena pomocí testu erozní odolnosti pevnými částicemi. Detaily testu jsou uvedeny ve

výzkumné zprávě [8]. Pro vybrané typy povlaků byl realizován test odolnosti proti opotřebení vodními kapkami.

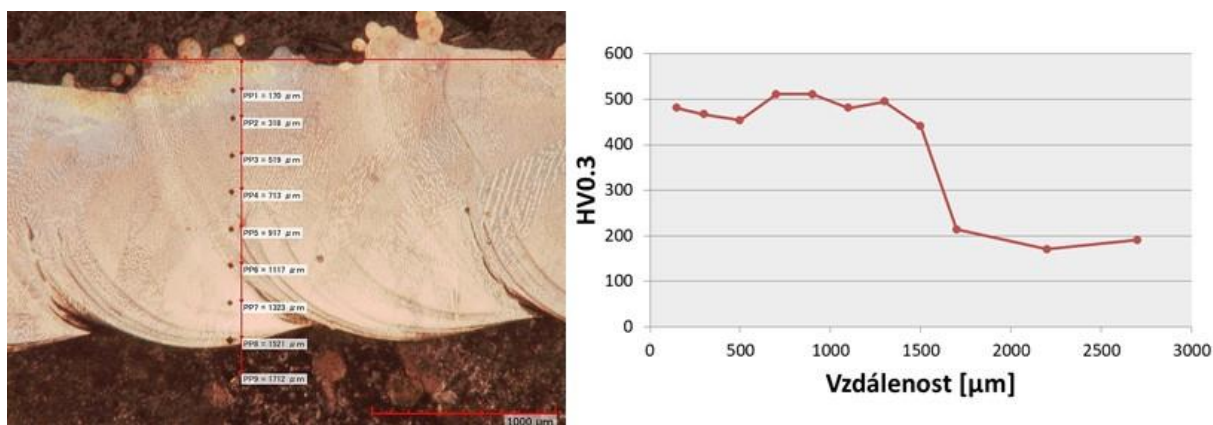
Vybrané výsledky jsou uvedeny v grafech na obr. 1 až obr. 6.

Porovnání průměrných hodnot tvrdosti HV 0.3 hodnocených žárově stříkaných povlaků a laserového návaru je uvedeno v grafu na obr. 1. Tvrdost povlaku Stellite 6, navařeného laserem, je v porovnání s povlakem stříkaným HVOF nižší, srovnatelná s nejměkčím HVOF nástřikem Hastelloy C-276.



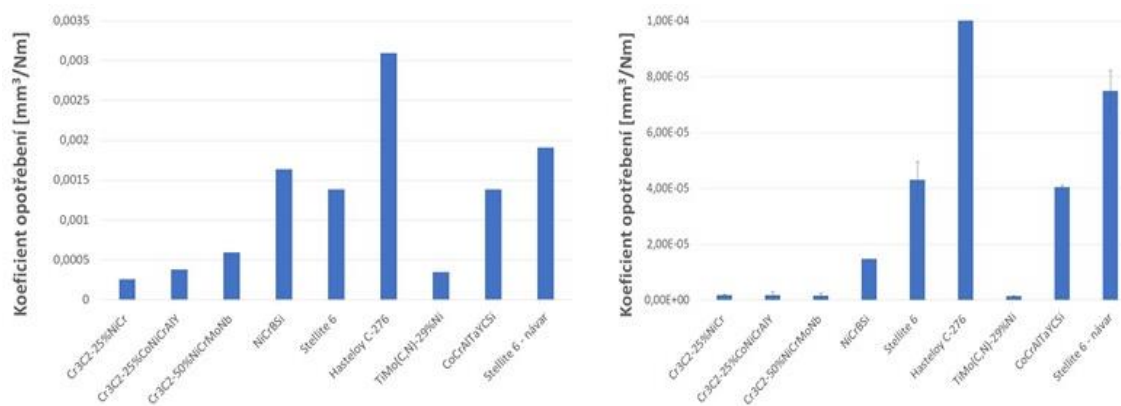
Obr. 1: Porovnání hodnot mikrotvrdosti HV 0.3, měřené na příčném řezu povlaky

Na obr. 2 je znázorněn hloubkový profil tvrdosti HV 0.3 laserového návaru Stellite 6. Tvrdost je mírným způsobem ovlivněná překryvem – v oblasti překryvu je hodnota HV 0.3 nižší, což odpovídá více hrubozrnné struktuře po přetavení.



Obr. 2: Hloubkový profil tvrdosti laserového návaru Stellite 6

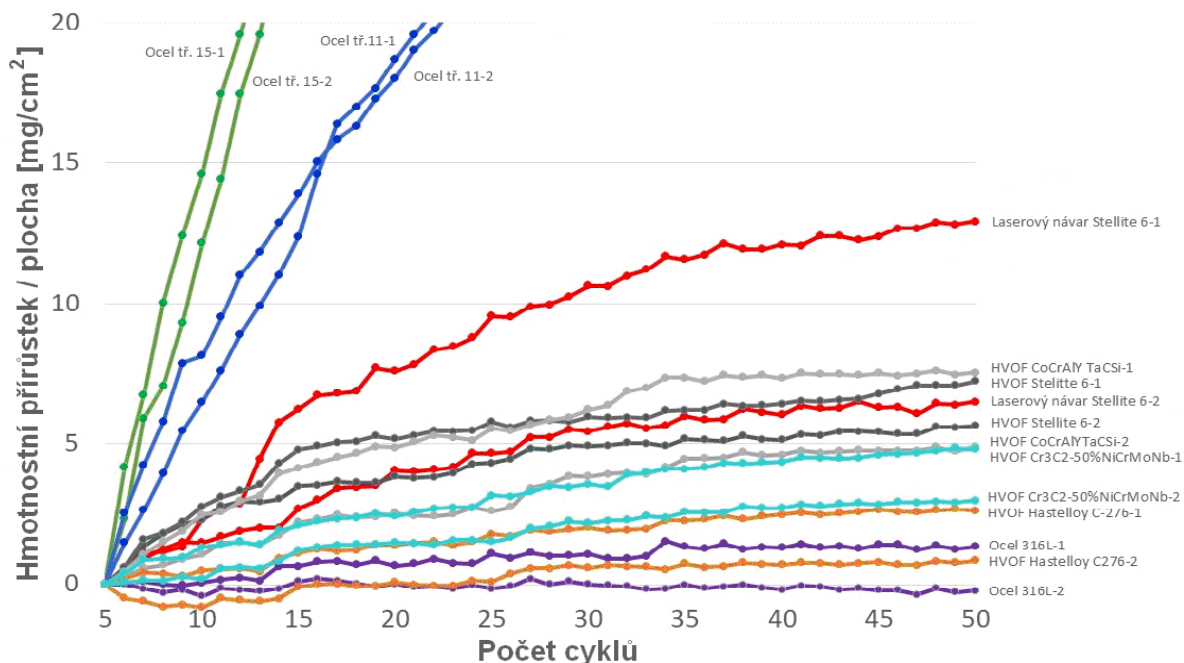
Odolnost proti abrazivnímu i kluznému a kluznému opotřebení laserového návaru Stellite 6 v porovnání s HVOF nástřiky je uvedena na obr. 3. Odolnost návaru je nižší než HVOF nástřiku Stellite 6 či CoCrAlTaSiC slitiny a výrazně nižší než odolnost HVOF cermetových nástřiků, nicméně je vyšší než odolnost HVOF povlaku Hastelloy C-276, a to i přes srovnatelnou mikro-tvrdost obou povlaků (obr. 1).



Obr. 3: Koefficient opotřebení HVOF povlaků a laserového návaru Stellite 6 při zkoušce dle ASTM G-65 (vlevo) a ASTM G-133 (vpravo)

Výsledky hodnocení odolnosti HVOF stříkaných povlaků proti vysokoteplotní korozi v prostředí 18% Na_2SO_4 82% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, odpovídajícímu prostředí ve fluidních spalovacích kotlích na pevná paliva (uhlí), jsou uvedeny v grafu na obr. 4.

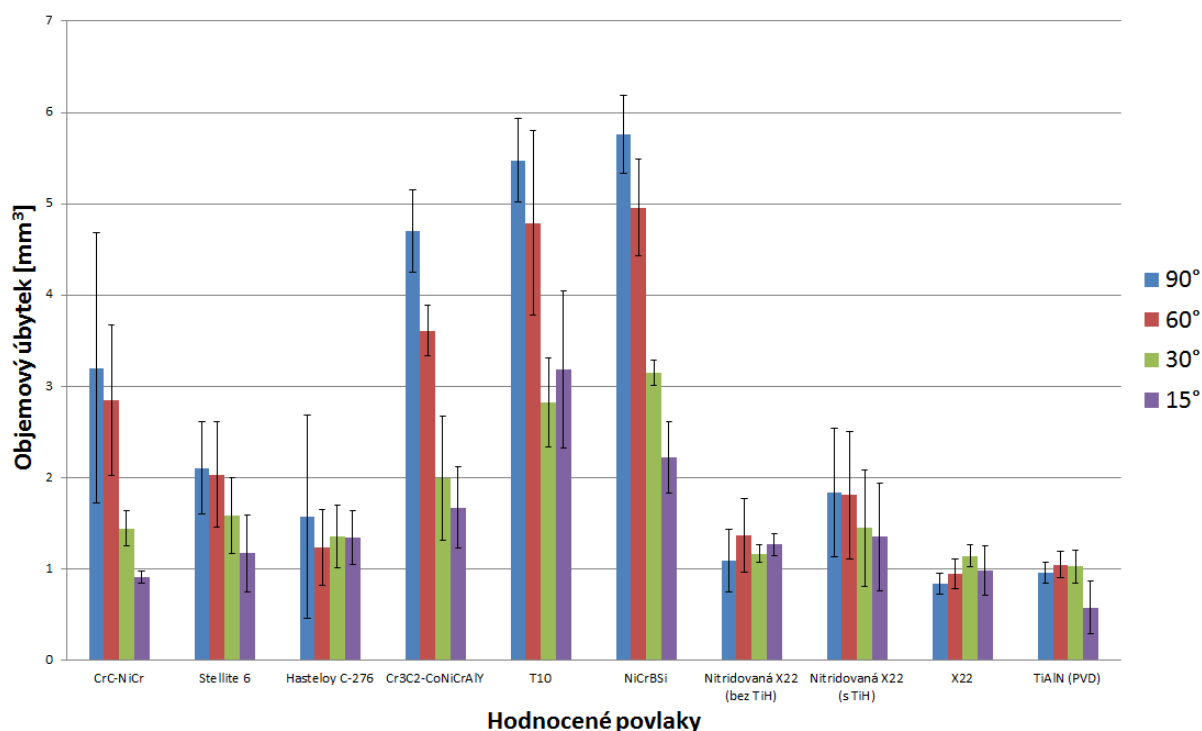
Z těchto výsledků je zjevné, že nejvíce v daném prostředí korodoval samotný substrát z oceli třídy 11 a z oceli třídy 15. Naopak, substrát z chromové oceli 316L byl v daném prostředí téměř inertní. Korozní odolnost povlaků na bázi Stellite (HVOF Stellite 6, HVOF CoCrAlYTaSiC a laserový návar Stellite 6) měla obdobný charakter. V rámci chyby obou dvou měření pro jeden materiál lze považovat jejich korozní odolnost za identickou (tzn. lze konstatovat, že není rozdíl mezi laserovým návarem a HVOF nástřikem). Vyšší korozní odolnost byla pozorována u povlaků na bázi Ni (slitina Hastelloy C-276) a také nástřik Cr_3C_2 -50%NiCrMoNb, který kromě odolnosti proti korozi má i vynikající mechanické vlastnosti.



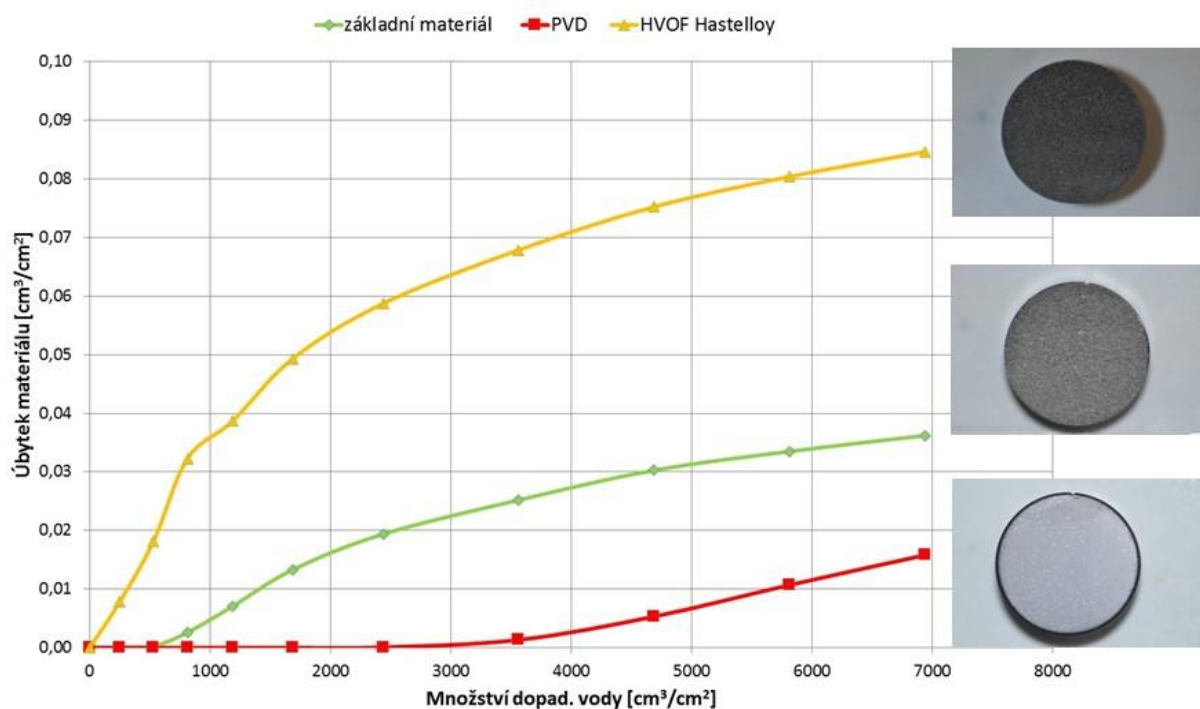
Obr. 4: Kumulativní hmotnostní přírůstek v závislosti na počtu cyklů

Výsledky hodnocení odolnosti proti eroznímu opotřebení pevnými částicemi jsou uvedeny v grafu na obr. 5. Z výsledků je patrné, že erozní odolnost HVOF stříkaných povlaků není příliš vysoká, a to ani ve srovnání se samotným základním materiálem. Nejlepších výsledků dosáhly

povlaky na bázi Stellite 6 a Hastelloy C-276, ale ani ty nelze doporučit jako účinné ke zvýšení odolnosti proti eroznímu opotřebení. Na rozdíl od abrazivního a kluzného opotřebení, kde je výhodou vyšší tvrdost povlaků na bázi cermetů, je v případě odolnosti proti eroznímu opotřebení rozhodující kohezní pevnost a houževnatost povlaků.



Obr. 5: Porovnání erozní odolnosti povlaků při dopadu erodentu pod různými úhly



Obr. 6: Objemový úbytek při testu erozní odolnosti vodními kapkami

Další test byl zaměřen na porovnání odolnosti proti působení vodních kapek na materiál povlaku HVOF nástřiku Hastelloy C-276, který prokázal ve zkouškách erozní odolnosti nejlepší vlastnosti (obr. 6). Jeho odolnost proti působení vodních kapek byla porovnána s odolností referenční PVD vrstvy a samotného základního materiálu. I v tomto případě se HVOF nástřik ukázal jako nevhodný k ochraně součástí namáhaných dopadem vodních kapek.

Pokročilá numerická analýza vibrací lopatek parních turbín

Jedním z problémů řešených dlouhodobě v rámci projektu je analýza kmitání svazků lopatek a olopatkovaných disků související s životností a spolehlivostí lopatek za provozu. Cílem výzkumu jsou zejména hlubší pochopení dějů při interakci lopatek a návrh optimální konstrukce z pohledu co nejvyšší životnosti, která je úzce spjata s minimalizací amplitud kmitání při nájezdech, dojezdech i při ustáleném provozu turbín.

S využitím vhodného výpočtového modelu olopatkovaného disku lze navrhovat spolehlivé komponenty parních i plynových turbín, přičemž v praxi se pro návrh olopatkovaných disků využívají zejména modely pro analýzu vibrací ve frekvenční oblasti [9], [10]. V této kapitole je stručně představena metodika modelování olopatkovaných disků s interagujícími lopatkami vhodná pro analýzu kmitání v časové oblasti, což přináší jiné informace o řešení problému.

Metodika modelování olopatkovaných disků v časové oblasti je založena na modální analýze rotující a netlumené lopatky, jejíž matematický model lze vyjádřit ve tvaru

$$\mathbf{M}_s \cdot \frac{d^2 \mathbf{q}_s}{dt^2} + (\mathbf{K}_s + \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_{os}) \cdot \mathbf{q}_s = \mathbf{0}, \quad s = 1, 2, \dots, n_B, \quad (1)$$

kde $\mathbf{M}_s$ je matice hmotnosti lopatky, $\mathbf{K}_s$ je matice tuhosti, ω_0 je úhlová rychlost rotoru turbíny, $\mathbf{K}_{os}$ je příspěvek zpevnění za rotace, $\mathbf{q}_s$ je vektor zobecněných souřadnic a n_B je počet lopatek olopatkovaného disku. Výsledkem modální analýzy modelu (3) jsou vlastní frekvence a příslušné vlastní tvary kmitání, které jsou využity pro sestavení spektrální matice Λ , matice modálního tlumení $\mathbf{D}$ a celkové modální matice $\mathbf{V}$. Výpočtový model samotné lopatky nebo celé výseče včetně části disku je ve většině případů vytvářen ve vybraném komerčním programovém systému na bázi metody konečných prvků, zatímco pro celkový redukovaný model je využíváno vlastní programové vybavení.

Za účelem redukce modelu lze původní konfigurační prostor zobecněných souřadnic olopatkovaného disku transformovat pomocí vztahu

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{q}_{n_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{0} \\ & \mathbf{O} & & \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{V}_{n_B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{x}_{n_B} \end{bmatrix} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{x}, \quad (2)$$

kde $\mathbf{x}$ je nový konfigurační prostor redukovaného systému.

S využitím této transformace a po další úpravě lze původní plný model přepsat do redukované podoby

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{x} + (\mathbf{D} + \mathbf{V}^T \cdot \omega_0 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}) \cdot \mathbf{x} + [\Lambda + \mathbf{V}^T \cdot (\omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_\omega - \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_d) \cdot \mathbf{V}] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{V}^T \cdot (\omega_0^2 \cdot \mathbf{f}_\omega - \mathbf{f}(t)) \quad (3)$$

kde $\mathbf{E}$ je matice s jedničkami na diagonále, $\mathbf{G}$, $\mathbf{K}_\omega$, $\mathbf{K}_d$ a $\mathbf{f}_\omega$ reprezentují vlivy rotace a $\mathbf{f}(t)$ je vektor zobecněných vnějších sil. Výhodou tohoto přístupu je, že spektrální matici, modální matici a ostatní matice a vektor reprezentující vlivy rotace je nutné exportovat z původního softwaru pro jednu konkrétní lopatku pouze na začátku vytváření celkového modelu. Dále už

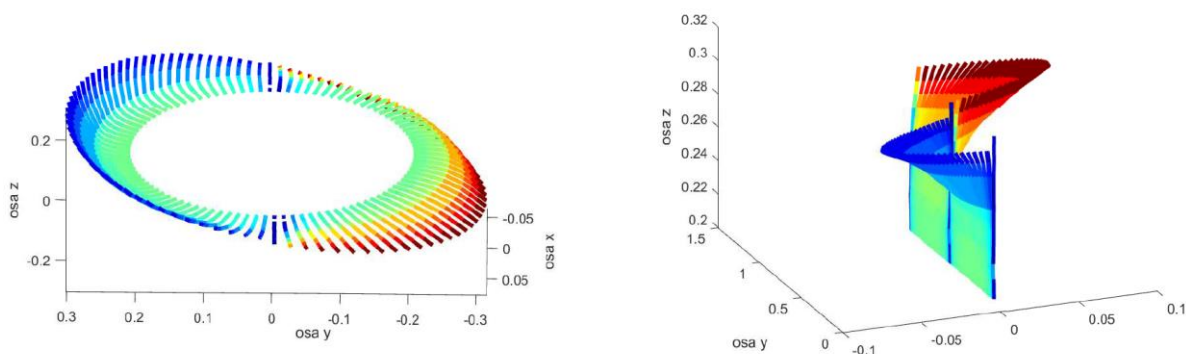
se pracuje pouze s redukovanými maticemi, které jsou buď konstantní nebo lineárně závislé na úhlové rychlosti disku.

Po zavedení nelineárních vazeb mezi jednotlivými lopatkami má celkový model tvar

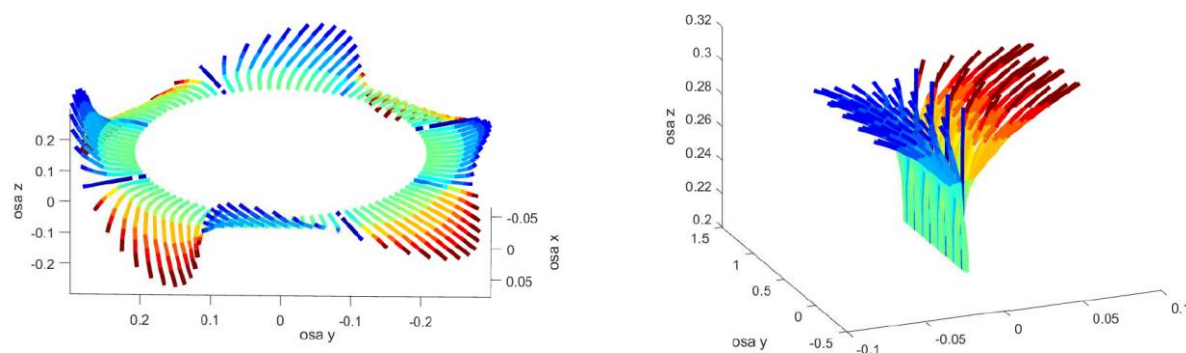
$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{x} + \left(\mathbf{D} + \mathbf{V}^T \cdot \omega_0 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{V} + \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{V} \right) \cdot \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \left[\mathbf{A} + \mathbf{V}^T \cdot \left(\omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_\omega - \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_c \right) \cdot \mathbf{V} \right] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{V}^T \cdot \left(\omega_0^2 \cdot \mathbf{f}_\omega - \mathbf{f}(t) \right) \quad (4)$$

kde $\mathbf{B}_c = \sum_{i=1}^{n_B} \mathbf{B}_i$ a $\mathbf{K}_c = \sum_{i=1}^{n_B} \mathbf{K}_i$ jsou celkové vazební matice a $\mathbf{B}_i$, $\mathbf{K}_i$ popisují vazbu mezi konkrétní lopatkou i a lopatkou $i + 1$ (jestliže $i = n_B$ potom $i + 1 = 1$). Nelineární vazební síly jsou vyjádřeny vektorem $\mathbf{f}(t)$.

Uvedená metodika modelování byla implementována do vlastního programového vybavení v prostředí systému MATLAB (viz např. [11] nebo [12]). Součástí programu jsou i skripty a procedury se zpracováváním postupy pro export potřebných dat jedné lopatky ze softwaru ANSYS (komerční program pro modelování samotné lopatky či výseče). Testování vyvinutých postupů a programového vybavení je podrobně popsáno v dizertační práci [11], ve které je představena aplikace metodiky na reálný olopatkovaný disk. Ukázka vizualizace vlastních tvarů reálného disku je na obr. 7 a obr. 8.



Obr. 7: Vizualizace třetího vlastního tvaru olopatkovaného disku



Obr. 8: Vizualizace osmého vlastního tvaru olopatkovaného disku

Závěr

V příspěvku je uveden výčet výsledků řešení projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci byl vytvořen i tento příspěvek) dosažených v roce 2018 a dva z nich jsou stručně představeny (porovnání vlastností žárových nástříků s jinými typy povrchových ochranných komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrací lopatek parních turbín).

Na rok 2019 je plánováno dosažení 29 odborných výsledků řešení projektu.

Literatura

- [1] Polach, P. (2012): Energetické centrum kompetence. *Sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 107-116. ISBN 978-80-261-0153-6
- [2] Polach, P. (2016): Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu. *Sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 145-150. ISBN 978-80-261-0644-9
- [3] Polach, P., Černý, V., Václavík, J. (2017): Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu. *Sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 91-96. ISBN 978-80-261-0741-5
- [4] Polach, P., Černý, J., Houdková, Š. (2018): Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu II. *Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 137-142. ISBN 978-80-261-0794-1
- [5] Houdková, Š., Česánek, Z. (2018): *Porovnání žárových nástřiků s konkurenčními typy povrchových ochranných vrstev*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/18/028, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [6] Houdková, Š., Česánek, Z. (2017): *Tepelně-mechanické vlastnosti vybraných žárově stříkaných povlaků*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/042, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [7] Česánek, Z., Kopelentová, K., Houdková, Š. (2016): *Hodnocení odolnosti vybraných žárových nástřiků proti vysokoteplotní korozi*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/056, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [8] Česánek, Z., Houdková, Š. (2016): *Porovnání erozivní odolnosti konkurenčních povrchových úprav*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/16/005, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [9] Voldřich, J., Lazar, J., Polach, P., Morávka, Š. (2017): Finding the stiffnesses of interface contact elements for the computational model of steam turbine blading. *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2017)*, Volume 8: 29th Conference on Mechanical Vibration and Noise. ASME, Cleveland (Ohio, USA), paper No. DETC2017-67712, pp. V008T12A018. ISBN 978-0-7918-5822-6
- [10] Zeman, V., Byrtus, M., Hajžman, M. (2010): *Harmonic forced vibration of two rotating blades with friction damping*. Engineering Mechanics, Vol. 17, No. 3/4, pp. 187-200. ISSN 1802-1484
- [11] Rycheký, D. (2018): *Modelování poddajných rotujících těles s kontaktními vazbami*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- [12] Pešek, L., Hajžman, M., Půst, L., Zeman, V., Byrtus, M., Brůha, J. (2015): *Experimental and numerical investigation of friction element dissipative effects in blade shrouding*. Nonlinear Dynamics, Vol. 79, No. 3, pp. 1711-1726. ISSN 0924-090X

NÁVRH A ROZBOR TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELI SUPER 304H PRO ODSTRANĚNÍ VYPRECIPITOVANÉ SIGMA FÁZE

DESIGN AND ANALYSIS OF THE HEAT TREATMENT FOR DISSOLVING OF SIGMA PHASE IN EXPOSED STEEL SUPER 304H

Jakub Horváth ^{a),b)}, Michal Junek ^{a),b)}, Jiří Janovec ^{a)}, Marie Rohlová ^{a)}, Lucie Pilsová ^{a)} a Vojtěch Smola ^{a)}

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

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

Abstrakt

Komplexně legovaná austenitická žárovečná ocel SUPER 304H byla speciálně navržena pro aplikaci na přehřívací plochy nadkritických bloků uhelných elektráren. Ocel je tak vystavena kombinaci mechanického napětí a působení zvýšené teploty. Tato kombinace provozních parametrů vede nejen k rozvoji procesů tečení, ale také k rozvoji precipitace křehké sigma fáze. Jedním z vlivů precipitace sigma fáze na ocel SUPER 304H je v její postupném zkrěnutí. Tento příspěvek se zabývá návrhem tepelného zpracování a následně hodnocením jeho dopadu na mikrostrukturu ocele SUPER 304H s cílem rozpustit sigma fázi. Pro hodnocení byly použity jako výchozí vzorky s laboratorní teplotní expozicí 20 000 hodin při teplotě 675 °C. Důvodem pro návrh tohoto tepelného zpracování je nutnost přípravy materiálu pro následné opravné svařové spoje tak, aby nedošlo k porušení materiálu v důsledku zbytkových napětí po svařování.

Abstract

The highly alloyed austenitic creep-resistant steel SUPER 304H has been specially designed for application to superheaters of supercritical coal-fired power plant blocks. The steel is thus exposed to a combination of mechanical stress at elevated temperature. This combination of operating parameters not only leads to the development of creep processes, but also to the development of brittle sigma phase precipitation. One of the effects of sigma phase precipitation on SUPER 304H is its gradual embrittlement. This paper deals with the design of heat treatment and consequently its impact on the microstructure of SUPER 304H with the aim of dissolving the sigma phase. Like the experimental material was used laboratory isothermally exposed material under condition 20 000 hours at 675 °C. The reason for designing this heat treatment is the necessity of preparing the material for subsequent repair weld joints so as not to break the material due to residual stresses after welding.

Úvod

Ocel SUPER 304H (označována jako X10CrNiCuNb 18-9-3) se řadí do skupiny austenitických ocelí 18%Cr-8%Ni. Optimalizací obsahu C a přidáváním legujících prvků N, B, Al a Cu byla zlepšena odolnost proti tečení. V porovnání se staršími ocelmi, jako je například TP347H, má vyšší mez pevnosti v tečení až o 20 % a také lépe odolává oxidaci za vysokých teplot [1]. Nicméně komplexní legování vede také k termodynamické nestabilitě slitiny a k precipitaci částic v mikrostruktuře během provozní expozice. Jedním z tipů těchto částic je sigma fáze.

Sigma fáze je intermetalikum s tetragonálním uspořádáním mřížky vyznačující se svou tvrdostí a křehkostí. Obecný rozsah precipitačních teplot je 500-800 °C [2]. Vznik této sekundární fáze bývá pro slitiny náchylné k jejímu vzniku akcelerován různými vlivy jako je plastická deformace, předvnesené napětí nebo zvýšená lokální koncentrace prvků jako je Cr.

V technických slitinách bývá sigma fáze většinou nežádoucí. Negativní vliv této fáze lze pozorovat ve třech oblastech – lokální křehnutí, zvýšená náchylnost k trhlinám za tepla a sni-

žení korozivzdornosti. Za určitých podmínek ji lze využít jako vytvrzující, například v ternárních soustavách Cr-W-Fe nebo Cr-Mo-Fe [3].

Stabilitu sigma fáze ovlivňuje její chemické složení a přítomnost nečistot. Vznik sigma fáze podporuje Mo, Si, méně pak Mn a Co. Omezení vzniku sigma fáze napomáhá legování N a poté C. Rychlost růstu a rozpadu sigma fáze ovlivňuje režim tepelného zpracování a také plastická deformace v předchozích operacích [2].

Nukleace sigma fáze může začít v různých oblastech struktury. Dle [3] rozlišujeme v korozivzdorných ocelích kritická místa vzniku, a to na hranicích zrn, trojném styku zrn a celulárně (nebo v rozích) v delta feritu. Obecně precipitace sigma fáze v oceli SUPER 304H je velmi pomalý děj, který je ovšem nutné kontrolovat a při jeho určité kritické hranici přistoupit k nutným opatřením jako je výměna komponenty, či jejímu tepelnému přepracování.

Experimentální část

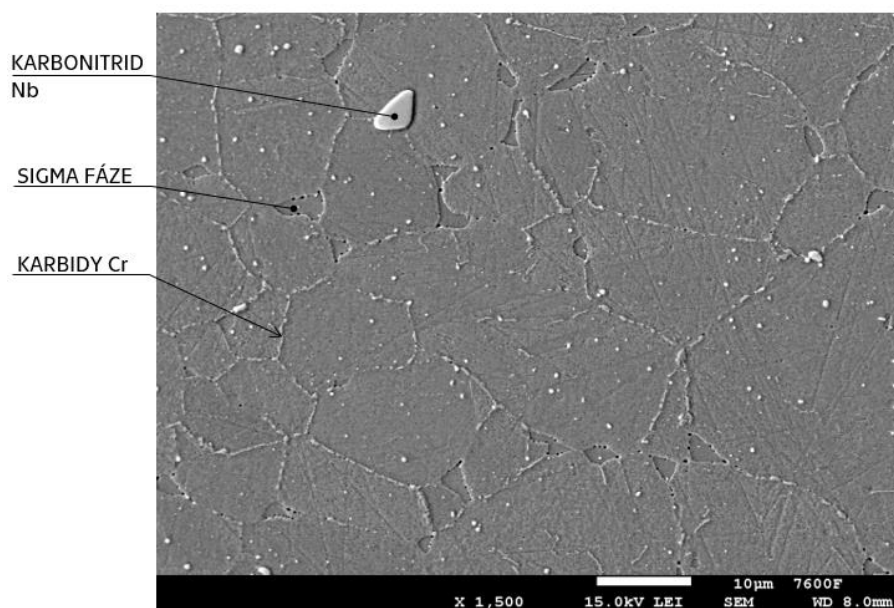
Experimentální materiál byl dodán ve formě bezešvých trubek dokončovaných za studena, o průměru 38,0 mm, tloušťce stěny 6,3 mm v délkách 4500-5500 mm. Před dodáním byl materiál podroben rozpouštěcímu žihání s výdrží 2 min na teplotě 1150 °C s následným ochlazením ve vodě [4, 5]. Po zdokumentování struktury (obr. 1) dodaného materiálu byla ocel podrobena laboratorní expozici 675 °C po dobu 20 000 h. V materiálu dodaném výrobcem nebyla dokumentována přítomnost vyprecipitované sigma fáze, jsou zde přítomny pouze karbonitridy niobu.



Obr. 1: Mikrostruktura dodané oceli SUPER 304H (světelný mikroskop)

Laboratorně exponovaný materiál

V laboratorně exponovaném materiálu (20 000 h/675 °C) označeném EM1 bylo možné pozorovat výskyt sigma fáze převážně na trojných stycích hranic zrn. Po hranicích rekrystalizovaných zrn byly vyloučeny jemné karbidy Cr a v matici se vyskytovaly karbonitridy Nb (obr. 2). Tím je dokumentován proces degradace způsobený teplotní expozicí, který má ovšem přímý vliv na mechanické a tím pádem i aplikační vlastnosti materiálu.



Obr. 2: Snímek EM1 pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu

Mechanické zkoušky základního a výchozího exponovaného materiálu

Pro porovnání výsledků dopadu tepelného zpracování bylo provedeno (případně převzato) hodnocení mechanických vlastností jako byly zkoušky rázem v ohybu, zkoušky tahem a měření tvrdosti. Absorbovaná energie dodaného materiálu dle inspekčního certifikátu [5] byla měřena na redukovaných tyčích 10x2,5 mm, což v přepočtu na redukovanou tyč 10x5 mm znamená hodnotu 62 J. Na exponovaném materiálu bylo měření provedeno na redukovaných tyčích 10x5 mm. Měřená průměrná hodnota byla 28 J, což potvrzuje postupující zkřehnutí ocele SURER 304H v důsledku její expozice.

Dopad teplotní expozice na pevnost ocele SUPER 304H je dokumentovatelný na nárůstu meze kluzu i meze pevnosti. Měřená mez kluzu pro základní materiál byla 305 MPa a mez pevnosti 638 MPa. Exponovaný materiál vykazuje zpevnění jak na mez kluzu, tak i na mez pevnosti. Měřené hodnoty pro exponovaný materiál byly 328 MPa na mez kluzu a 718 MPa na mez pevnosti. Stejný trend byl dokumentován i z měření tvrdosti, kde došlo k nárůstu tvrdosti z hodnoty pro základní materiál 170 HV10 na tvrdost 202 HV10 pro exponovaný materiál. Na základě tvrdosti bude dokumentováno i úspěšné provedení tepelného zpracování materiálu.

Návrh tepelného zpracování

Pro výpočet doby ohřevu τ [h] byl použit vztah dle Dobrochotova [6]:

$$\tau = k_M \cdot \kappa \cdot t_p \cdot \sqrt{t_p}, \quad (1)$$

kde charakteristický rozměr polotovaru je roven $t_p = 16,6 \times 10^{-3}$ m, součinitel rozmístění v peci $\kappa = 1,25$ (pro osamocený vzorek na keramické podložce), materiálový součinitel pro vysokolegované oceli $k_M = 20$.

$$\tau = 20 \cdot 1,25 \cdot 16,6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{16,6 \cdot 10^{-3}} = 191 \text{ s.}$$

Pro dobu výdrže byl použit orientační vztah [6]:

$$\tau_v = \tau \cdot 1,25. \quad (2)$$

Doba ohřevu byla vypočtena dle (1) na 3 min a od ní se odvíjející doba výdrže dle (2) na přibližně 4 min. Doba ohřevu a výdrže stanovená dle empirických vzorků se jevila velmi krátká, proto pro porovnání byla zvolena i delší doba teplotní výdrže vzorku v peci, a to 60 min. Navržené teplotní režimy shrnuje tab. 1.

Tab. 1: Navržené režimy tepelného zpracování

Vzorek	ZM1	EM1	ZM2	EM2	ZM3	EM3	ZM4	EM4	ZM5	EM5	ZM6	EM6
T [°C]		675	900	900	900	900	1100	1100	1100	1100	1000	1000
Doba pobytu v peci [min]	Dodaný stav	20 000 h	7	7	60	60	7	7	60	60	7	7

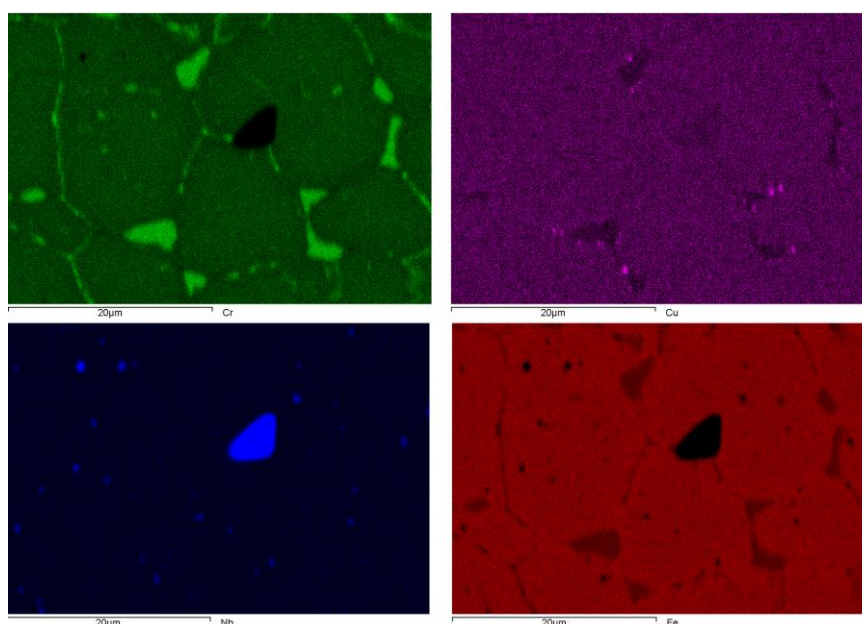
Diskuze

Na základě pozorování na elektronovém mikroskopu lze tvrdit, že sigma fáze se v exponovaném materiálu nejčastěji vyskytuje v místě trojného styku zrn, kde silně ovlivňuje mechanické vlastnosti degradovaného materiálu. Sigma fáze je v tomto případě pozorovatelná i na světelném mikroskopu. Ve struktuře se dále nalézají rekrystalizovaná polyedrická zrna s karbidy chromu vyprecipitovanými po hranicích zrn.

Analýza EDS na skenovacím elektronovém mikroskopu prokázala shodu ve složení sigma fáze uvedenou v literatuře [3, 7, 8] se složením sigma fáze měřené na vzorku EM1. Složení sigma fáze pro dvě separované částice uvádí tab. 2. Obecně lze konstatovat, že sigma fáze je intermetalikum bohaté na chrom a železo, což dokládají i výsledky v tab. 2. Chemické mapy na obr. 3 potvrzují, že sigma fáze částečně absorbuje do své struktury Cr z okolní matrice. Jsou patrné také kolonie Cu shlukující se na hranicích sigma fáze. Toto je způsobeno nerozpustností Cu v sigma fázi, která vytlačuje Cu před svou precipitační frontu.

Tab. 2: Analýza EDS sigma fáze ve vzorku EM1

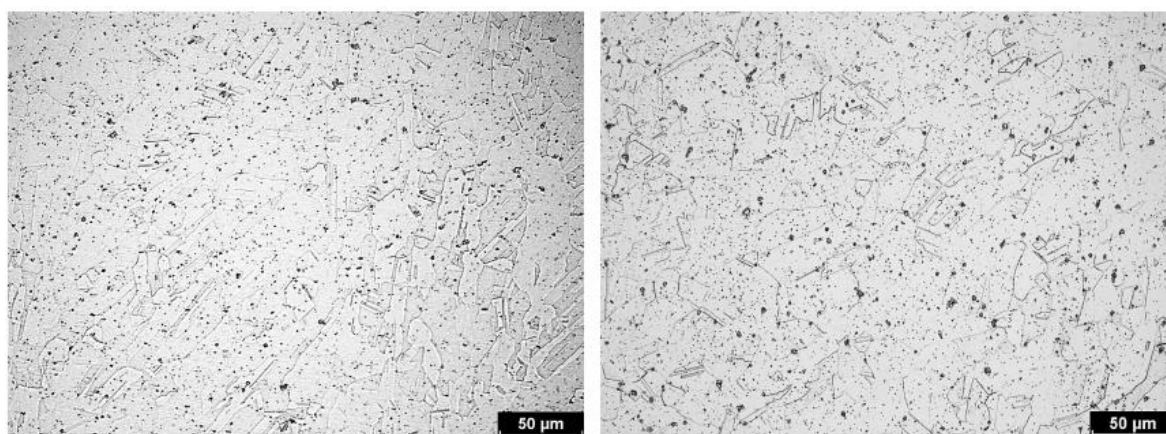
Spektrum	Si	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb
Částice 1	0,78	35,20	46,41	3,00	10,81	3,80
Částice 2	0,66	35,21	48,14	3,24	11,02	-



Obr. 3: Chemická mapa EM1 (Cr, Cu, Nb, Fe)

Cílem navrženého tepelného zpracování je, aby výsledná mikrostruktura odpovídala co nejlépe dodanému materiálu od výrobce, a aby nedošlo k degradaci deklarovaných vlastností původního materiálu například zhrubnutím zrna, nebo vytvořením lokálních kolonií částic.

Podle [3] by sigma fáze obecně měla být odstraněna tepelným zpracováním za teploty 1050 °C. Pozorováním na elektronovém mikroskopu bylo potvrzeno, že u oceli SUPER 304H došlo k rozpuštění sigma fáze při režimu 1100 °C / 7 min (vzorek EM4). Dokumentace mikrostruktury u vzorku EM4 po tepelném zpracování potvrzuje že strukturní stav odpovídala materiálu před teplotní expozicí ZM1 (tedy výrobcem dodanému materiálu). Srovnání austenitické struktury základního materiálu ZM1 a vzorku EM4 ukazuje obr. 4.



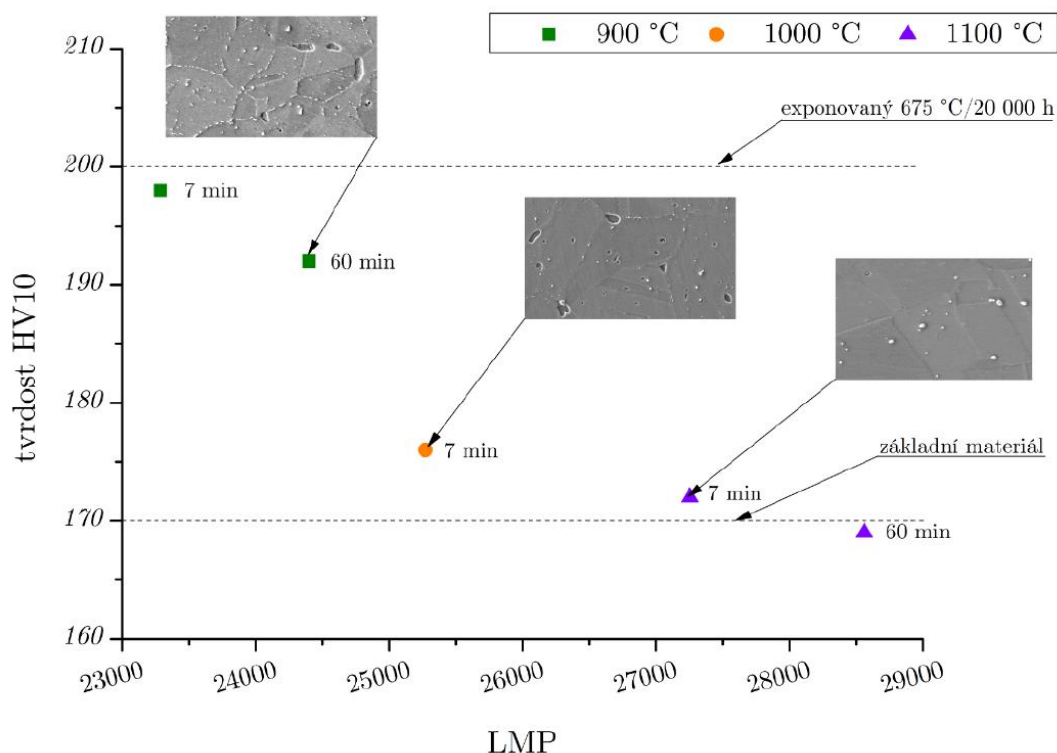
Obr. 4: Porovnání struktury EM4 a ZM1

Z porovnání mikrostruktury lze pozorovat jednak rozpuštění sigma fáze, jednak fakt, že na karbonitridy niobu nemělo tepelné zpracování vliv. Poslední částice dokumentované v mikrostruktuře byly karbidy chromu, u kterých došlo také k jejich rozpuštění. Tím by se dala mikrostruktura z pohledu částic hodnotit jako plně odpovídající mikrostruktuře základního materiálu.

Druhým krokem bylo ověření, zda nedošlo provedením tepelného zpracování ke zhrubnutí zrna, které by bylo kritické z pohledu zachování žárovevnosti ocele SUPER 304H. U všech vzorků bylo provedeno měření velikosti zrna lineární metodou a vypočteno číslo velikosti zrna, konkrétně u ZM1 byla stanovena velikost zrna $G = 8$, která bude sloužit jako referenční hodnota. Stejně tak u tepelně zpracovaných EM4 a EM5 byla stanovena velikost zrna $G = 8$. Tento výsledek potvrzuje, že nedošlo ke zhrubnutí zrna provedením tepelného zpracování a tím pádem ke znehodnocení vlastností z pohledu žárovevnosti. Hodnota čísla velikosti zrna G byla stanovena i pro ostatní vzorky a mezi jednotlivými vzorky se nelišila o více než jeden stupeň velikosti G .

Jako poslední bylo provedeno měření tvrdosti kvůli zhodnocení dopadu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti. Měření tvrdosti prokázalo, že výskyt sigma fáze v mikrostruktuře souvisí s nárůstem tvrdosti materiálu. U základního materiálu ZM1 dodaného výrobcem byla tvrdost stanovena 170 HV10, naopak po teplotní expozici 20 000 h/675 °C vzrostla tvrdost až na 202 HV10. Úspěšnost TZ a tedy rozpouštění křehké sigma fáze lze potvrdit na základě změřeného poklesu tvrdosti na hodnotu, 172 HV10 u EM4 (1100 °C/7 min), resp. 169 HV10 u EM5 (1100 °C/60 min), k počáteční tvrdosti 170 HV10. Celkové hodnocení změřené tvrdosti spolu s přiřazenými mikrostrukturními stavy je zobrazeno na následujícím obr. 5.

Celkově tak na základě získaných výsledků lze zhodnotit, že je možné tepelně přepracovat degradovaný materiál SUPER 304H, tak aby došlo k odstranění negativního vlivu sigma fáze na ocel SUPER 304H. Dalším krokem bude nutné stanovit, zda proces degradace materiálu bude mít stejnou kinetiku jako před provedením tepelného zpracování.



Obr. 5: Dopad tepelného zpracování na změnu mechanických vlastností včetně mikrostruktur

Poděkování

Tento příspěvek vznikl na základě výsledků získaných za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu č. FV40166.

Literatura

- [1] Abe, F., Kern, T.-U. (2008): *Creep-resistant steels*. Woodhead, Cambridge. ISBN 978-1-84569-178-3
- [2] Roubal, M. (1967): *Sigma fáze a její vlastnosti*. Výzkumná zpráva, č. Z-67-1867/I, Státní výzkumný ústav materiálu, Praha.
- [3] Hsieh, C.-C., Wu, W. (2012): *Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels*. ISRN Metallurgy, Vol. 2012, paper 16. ISSN 2090-8717
- [4] Nippon Steel & Sumitomo Metals (2015): *Seamless Steel Tubes and Pipes for Boilers*. Katalog ocelí, Japonsko. Dostupné také z: http://www.nssmc.com/product/catalog/_download/pdf/P008en.pdf
- [5] Sumitomo Metal Industries (2012): *Inspection Certificate*. Inspekční zpráva o dodané tavbě, Amagasaki, Japonsko.
- [6] Drastík, F. (1960): *Kovářství*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- [7] Villanueva, D. M. E., Junior, F. C. P., Plaut, R. L., Padilha, A. F. (2013): *Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferitic and duplex*. Materials Science and Technology, Vol. 22, pp. 1098-1104. ISSN 0267-0836
- [8] Fonseca, G. S., Mendes, P. S. N., Silva, A. C. M. (2019): *Sigma Phase: Nucleation and Growth*. Metals, Vol. 9, No. 1, paper 34. ISSN 2075-4701

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

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

Jiří Dvořák ^{a)}, Václav Sklenička ^{a)}, Petr Král ^{a)}, Marie Kvapilová ^{a)}, Marie Svobodová ^{b)}, Jan Šifner ^{c)} a Václav Koula ^{c)}

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

^{b)} UJP PRAHA a.s.

^{c)} Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech. DAKEL – Středisko technické diagnostiky

Abstrakt

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

Abstract

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

Úvod

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

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

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

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

Experimentální materiál a testovací podmínky

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

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

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



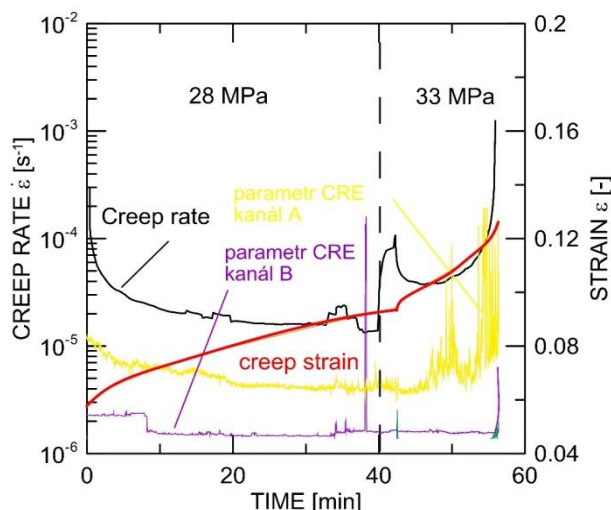
Obr. 1: Tahová sestava creepového stroje s adaptací zařízení pro měření AE

Creepové testy s detekcí AE a mikrostrukturní analýza

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

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

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

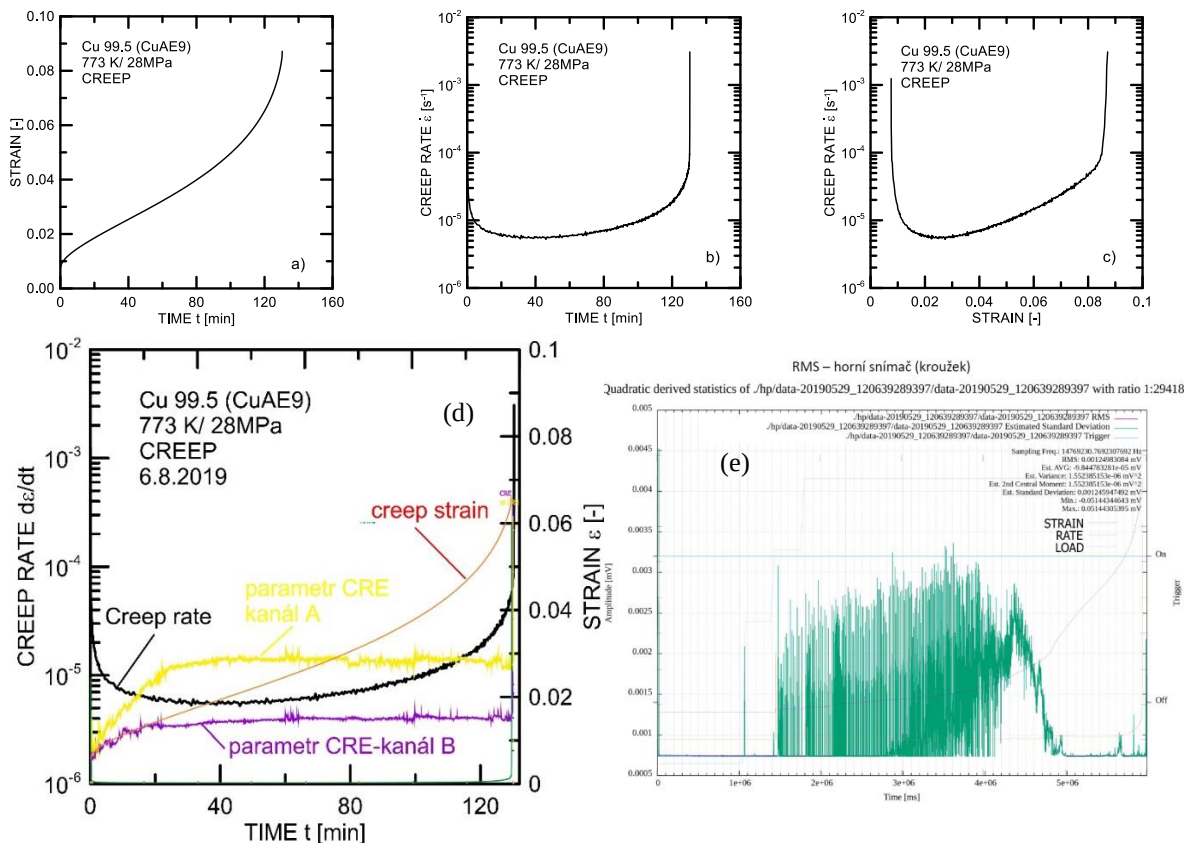


Obr. 2: Závislost creepové rychlosti, deformace a parametrů CRE [μV] na čase

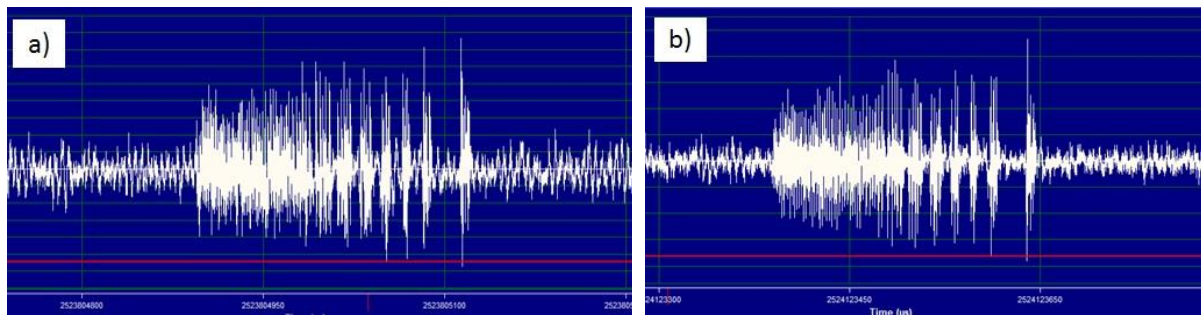
Standardní creepovou závislost creepové deformace mědi s pouze technickou čistotou (Cu 99,5), kde se dá předpokládat vyšší nukleace kavit v důsledku přítomnosti nečistot ve studovaném materiálu, na čase znázorňuje obr. 3a. Z důvodu predikce životnosti je důležité určení místa konce stacionárního a nástupu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

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

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

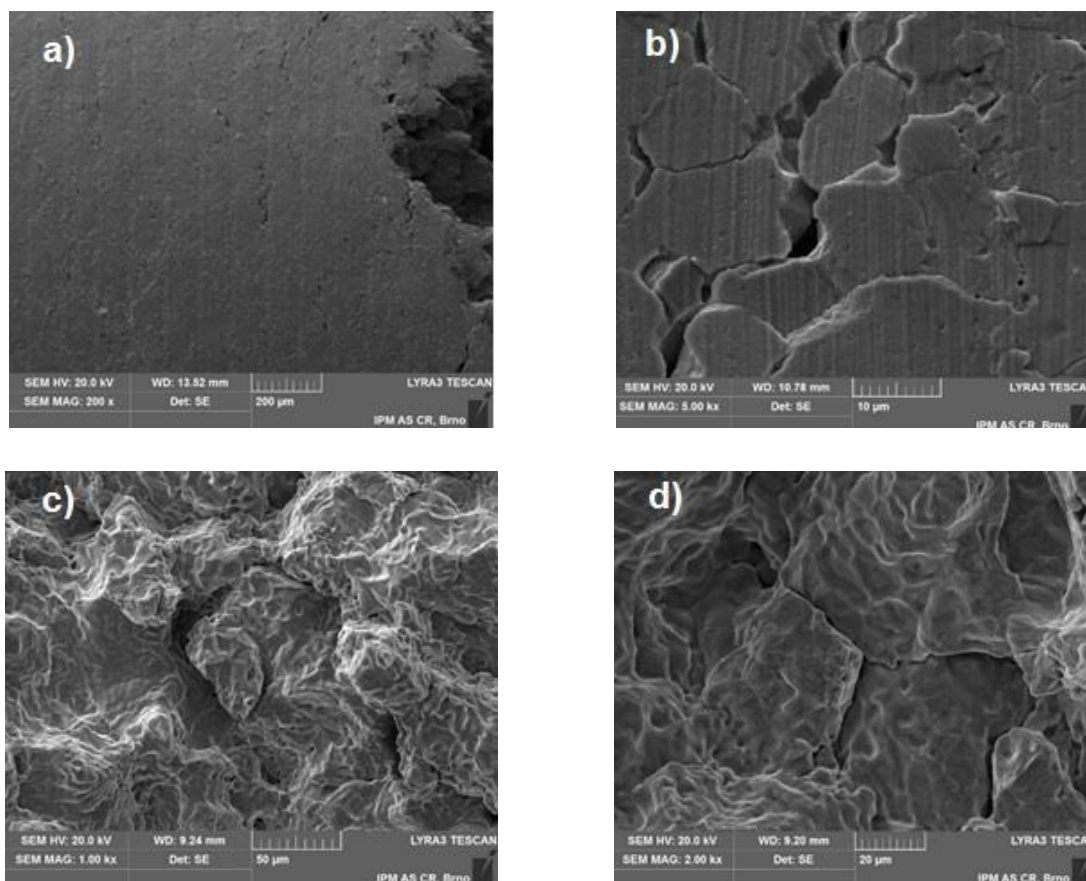


Obr. 3: Creepové charakteristiky Cu 99,5 při napětí 28 MPa a teplotě 500 °C: a) creepová deformace vs. čas, b) creepová rychlost vs. čas, c) creepová rychlost vs. deformace, d) srovnání parametru CRE se zakreslením parametrů creepové rychlosti a deformace, e) ukázka RMS (vzorek CuAE3)



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

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



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

Závěr

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

Poděkování

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

Literatura

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

PODMÍNKY DLOUHODOBÉ ŽIVOTNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ V ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍCH – VLIV PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ

CONDITIONS FOR LONG-TERM DURABILITY OF DISSIMILAR METAL WELDS OF POWER PLANTS – ENVIRONMENTAL EFFECT

Jaroslav Bystrianský ^{a)}, Miroslava Ernestová ^{b)}, Petr Haušild ^{b)}, Jan Siegl ^{c)} a Lubomír Junek ^{d)}

^{a)} VŠCHT Praha

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

^{c)} FJFI ČVUT Praha

^{d)} ÚAM Brno

Abstrakt

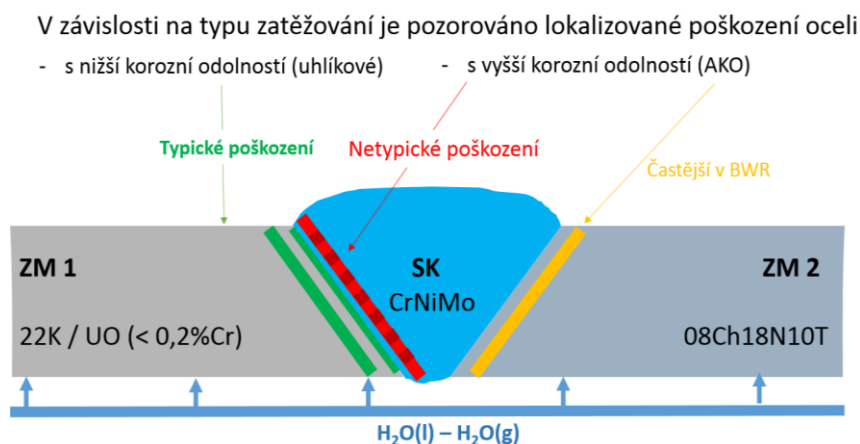
Heterogenní svarové spoje v energetických zařízeních představují uzly, které mohou mít za určitých podmínek sníženou životnost. Příčiny změny užitečných vlastností a způsoby poškození heterogenních svarových spojů lze rozdělit do dvou skupin podle teploty aplikace. Svarové spoje exponované při teplotách $t < 300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ podléhají poškození s významnějším vlivem prostředí. V příspěvku bude podána obecná charakteristika svarových spojů, s ohledem na specifické prostředí jaderných elektráren.

Abstract

Dissimilar metal welds in power plants equipment may have reduced service life under certain conditions. The causes of the change in utility properties and damage types of heterogeneous weld joints can be divided into two groups according to the application temperature. Welds exposed at temperatures $t < 300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ are subject to significant environmental damage. The paper will present general characteristics of dissimilar metal welds with regard to the specific environment of nuclear power plants.

Korozní poškození heterogenních svarových spojů

V okruzích českých elektráren i dalších elektrárnách obdobného typu (PWR) je pozorováno poškození heterogenních svarových spojů (HSS), které má charakter lokalizovaného defektu, šířícího se po či podél heterogenní hranice ztavení [1, 2, 3, 4], a to jak v uhlíkové oceli, tzn. v materiálu s nižší obecnou korozní odolností, tzv. typická, standardní poškození, tak i zdánlivě ve vysoce legovaném svarovém kovu, tzn. v materiálu s vyšší obecnou korozní odolností, tzv. netypická, nestandardní poškození (obr. 1).



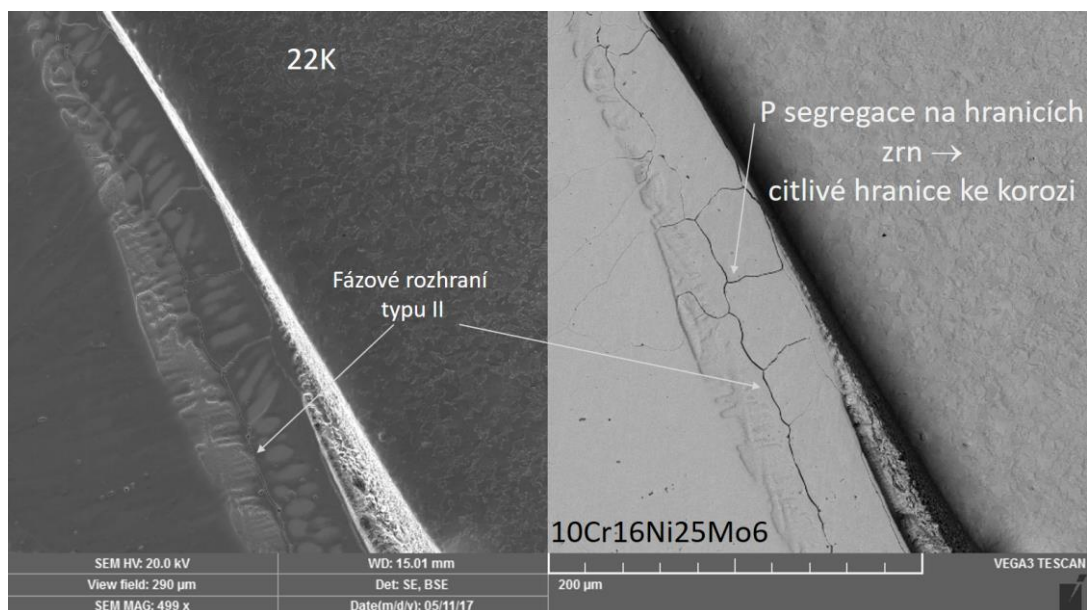
Obr. 1: Typy poškození heterogenních svarových spojů

Fraktografické projevy netypického poškození HSS

Z rozsáhlých destruktivních hodnocení poškozených i nepoškozených HSS, vyplynulo, že trhlinka netypického poškození HSS postupuje po hranici ztavení či v legované oceli svarového kovu (SK), interkrystalickou dekohezi a v menší míře transkrystalickým štěpením, [[1]]. Ústí trhliny / defektu v některých případech vycházelo z důlku v uhlíkové oceli, podél hranice ztavení u kořene svaru. S velkou pravděpodobností se jednalo o napadení z větší míry vzniklé až po narušení hranice ztavení trhlinou. Z magistrální trhliny často vybíhalo síťovitý mezikrystalových trhlin či naleptaných cest, svědčících jednak o přítomnosti víceosých napětí a citlivosti přilehlých hranic zrn k mezikrystalové korozi (MKK).

Materiálové řešení HSS

Většina svarových spojů je provedena přídavným materiálem s vysokou stabilitou austenitické struktury, 10Cr16Ni25Mo6N, vyznačujícím se nízkým poměrem $PFA = Cr_{EQ} : Ni_{EQ} < 1$ (výplň svaru, či poduška, která je v tavném styku s ocelí uhlíkovou). Tento materiál tuhne i chladne (podle aktuálního nařízení) v γ -oblasti a může vykazovat zvýšenou citlivost na projevy segregace nečistot, tj. primárně vysokoteplotní křehkost a citlivost k (MKK) vyvolanou neochuzením o Cr, ale segregací nečistot [5, 6] (obr. 2). Nyní je doporučeno použití přídavných materiálů typu 07Cr25Ni13 (i jako podušky), popř. 04Cr19Ni11Mo3 [7, 8, 9]. Tyto materiály mají vyšší poměr $Cr_{EQ} : Ni_{EQ}$, $1 < PFA < 2$, a při ochlazování procházejí oblastí dvoufázovou, přičemž může dojít k přerozdělení nečistot mezi koexistujícími fázemi γ - α , bez významnějšího uplatnění segregáčních projevů. Tato skupina materiálů je citlivější na tvorbu zákalných struktur podél tranzitní zóny (TZ), což hypoteticky zvyšuje jejich citlivost k poškození, při uplatnění vodíku ($t < 80^\circ C$).



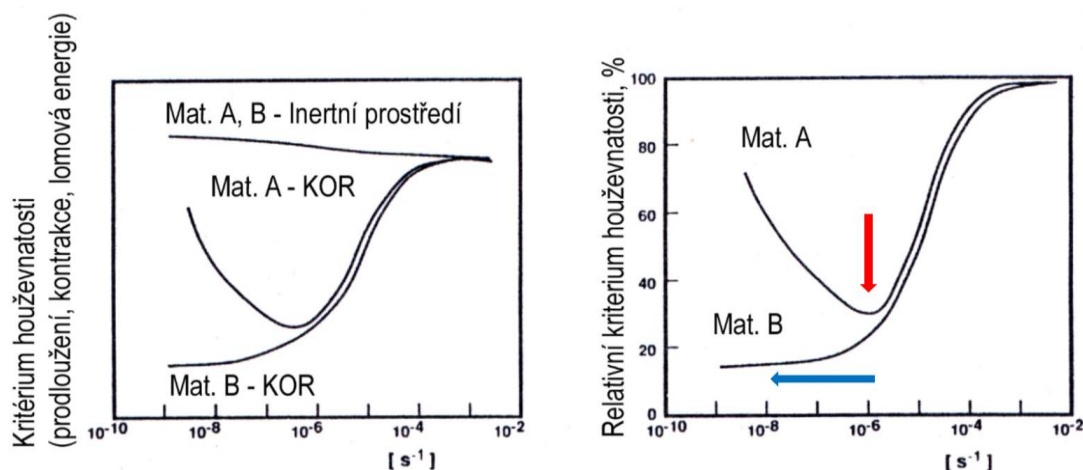
Obr. 2: Hranice ztavení se zvýrazněným fázovým rozhraním typu II a hranicemi citlivými ke korozi – segregace P

Zátěžové děje materiálů HSS

Pro nalezení klíčových dějů řídících iniciaci a šíření defektu v HSS, je nutné specifikovat zátěžové děje, jimž jsou vystaveny materiály HSS, a to zejména na heterogenní hranici ztavení či podél ní (v tranzitní zóně SK) či TOO uhlíkové oceli. O povaze vzniklého poškození rozhodují zátěžové děje, jimž jsou materiály HSS vystaveny.

Objemové zátěžové děje

Ze zátěžových dějů objemových je nutné věnovat pozornost teplotě a napětí-ovému/deformačním ovlivnění HSS. Primární přímý vliv teploty je nevýznamný z hlediska strukturní stability SK a TZ; během dlouhodobé ($>10\text{--}20$ let) expozice při teplotách $\approx 300^\circ\text{C}$ může dojít ke změnám feritické fáze (δ -ferit), či nevýznamnému prohloubení úrovně citlivosti k MKK v austenitické fázi vysoce legovaného svarového kovu. Nepřímý, avšak mnohem významnější vliv teploty je nutné spatřovat v generaci dilatačních napětí 3. a 2. typu, na rozhraní bloků s odlišným strukturním uspořádáním, zejména přechody $\alpha/\delta - \gamma$. Odlišné termomechanické vlastnosti se projeví při změnách teploty ($<60\text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$) relativní deformací feritické a austenitické fáze v rozsahu 3×10^{-8} a $5\times 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, což je oblast výskytu poškození, u nějž je řídicím dějem odlišný stav na postupující hraně / čele trhliny (aktivita) a dříve vytvořených površích, stěnách trhliny (pasivita – vysokoteplotní oxid) – viz obr. 3. Tento vliv je s velkou pravděpodobností přímou příčinou snížené životnosti heterogenních svarových spojů ($\approx 20\text{--}25$ let). Vlivem spolupůsobení nepříznivých kombinací materiálových, popř. i specifických vlivů na straně prostředí, může docházet k extrémnímu snížení životnosti HSS ($<2\text{--}5$ let).



Obr. 3: Modelový vliv relativní změny deformace materiálů HSS na projevy a charakter poškození; MAT A: rušená / stimulovaná oxidace, typické pro SK: 10Cr16Ni25Mo6N, MAT B: interakce za účasti vodíku, typické pro SK na bázi PM 07Cr25Ni13

Zátěžové děje ovlivňující povrch

Významnými zátěžovými ději, které se uplatňují na povrchu konstrukčních materiálů, jsou různé typy interakcí prostředí (řádného – korektního, mimořádného, specifického) s povrchem svaru / oceli, projevující se celkovým (koroze v pasivitě / aktivitě) nebo lokalizovaným úbytkem kovu.

Korozní odolnost materiálových variant HSS

Všechny materiálové varianty v okolí heterogenní hranice ztavení, jsou odolné v korektním prostředí sekundárního okruhu (l+g); jsou ve stavu pasivity či chráněny vysokoteplotním oxidem. V nekorektním prostředí (l / g), zejména během neřízených odstávek zařízení, podléhá zvýšené korozi ocel uhlíková, a to jak celková, tak i lokalizované (důlková koroze) – dochází k její krátkodobé či dlouhodobé aktivaci, celkovým nebo lokálním porušením ochranné vrstvy. K aktivaci vysoce legovaného SK zpravidla nedochází. Z hlediska vlivu prostředí na korozně odlišné materiály, by o životnosti HSS měl rozhodovat materiál s nižší korozní odolností. Celé materiálové spektrum, v „okolí heterogenní hranice ztavení“ HSS, vykazuje v korektních ty-

pických prostředích JE přijatelnou a využitelnou odolnost, až do maximálních provozních teplot. Původ této odolnosti obou krajních materiálových variant (Fe – CrNiMo) je buď:

- a) v pasivitě ($t < 160 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), kov je pokryt oxidickou vrstvou, tloušťka se s časem nemění,
- b) ve „vysokoteplotní pasivitě“, tj. ochraně povrchu oceli vysokoteplotním oxidem ($t > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), který zejména na UO při teplotách do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ měřitelně roste s teplotou a časem.

Vzniklé ochranné vrstvy, oxidy působí jako bariéra přímého kontaktu povrchu kovu s prostředím. Při narušení celistvosti ochranné vrstvy, může dojít až k odhalení kovu, tzv. aktivaci, přičemž následuje různě dlouhá epizoda intenzivnější koroze, oxidace. Lokalizované poškození oxidické vrstvy je primární podmínkou vzniku lokalizované poruchy a o „stabilitě“, tj. o nepotlačeném šíření defektu rozhodují další faktory materiálové, napěťové i environmentální. Narušeným zacelením poškozeného místa, dojde k opět ke snížení intenzity čerpání, úbytku kovu a přechodu do stavu pasivity, či nízké rychlosti vysokoteplotní oxidace. K narušení ochranné vrstvy může dojít / docházet opakovaně, způsobem mechanickým (deformace kovu – ochranné vrstvy, rázový účinek proudícího pracovního média, apod.) nebo chemickým (okludovaný roztok, kyslíkové články, odpar média atd.). Frekvence narušování za daných podmínek rozhoduje o rychlosti stabilního šíření podkritického defektu. Na ocelích vysoce legovaných ($w(\text{Cr}) > 5 - 8\text{ }\%$ hm.) jsou oba stavy (vzniklé vrstvy) mnohem odolnější vůči lokálnímu či celkovému narušení chemickým či mechanickým vlivem, ve srovnání s ocelí uhlíkovou. Na vysoce legovaném materiálu je ve většině typických prostředí JE narušení ochranné vrstvy chemickým účinkem nemožné nebo po mechanickém poškození se defekt tak rychle zacelí, pasivuje, že nedojde k významnějšímu úbytku kovu. Agresivita prostředí, jemuž jsou heterogenní svarové spoje vystaveny, je dána přítomností vody, rozpuštěných plynů (O_2 a CO_2), hodnotou pH, teplotou a přítomností malého množství iontově rozpuštěných látek; přítomnost rozpuštěných plynů lze očekávat ve vodném médiu při teplotách nižších než $130 - 160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Korozní podmínky ve vodné fázi jsou navíc ovlivněny přítomností masivnější vrstvy deponovaných látek na povrchu heterogenního spoje. Pro korozní chování ocelí HSS ve vodných prostředích je rozhodující obsah legujících prvků; zejména chromu. Proměnný obsah Ni se mírně projeví na změně chování při korozi oceli v aktivním stavu a při vysokoteplotní oxidaci. V závislosti na obsahu legujících prvků lze korozní odolnost jednotlivých materiálových variant charakterizovat takto:

- při odlišném korozním potenciálu dojde k tvorbě makročlánku: aktivní – aktivní, aktivní – pasivní,
- proměnná samovolná pasivovatelnost ($v_{\text{KOR_PAS}} \approx f(1/\text{Cr})$, $w_{\text{LIM}} > 10 - 12\text{ }\%$ hm.) ve vodných prostředích při teplotě $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bez ohledu na obsah kyslíku ve vodném prostředí),
- stabilita uhlíkové oceli je podmíněna koncentrací kyslíku ve vodě; v prostředích s velmi nízkou koncentrací kyslíku ve vodě, $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\kappa < 0,1\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$), koroduje UO velmi nízkou korozní rychlostí v aktivitě i pasivitě, oceli s vyšším obsahem chromu jsou pasivní,
- ve vodné fázi, $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\kappa < 0,1\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$), $w(\text{O}_2) > 400\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, jsou oceli s vyšším obsahem chromu v pasivitě, uhlíková ocel může přejít z pasivního stavu a podlehnout lokální aktivaci, vyšší vodivost prostředí aktivaci uhlíkové oceli urychluje,
- odlišnou rychlostí vysokoteplotní oxidace při teplotách $t > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{HT_OX}} = f(1/\text{Cr})$, charakterizovanou parabolickou konstantou, k_p ,
- rozdílnou odolností k lokalizované korozi ($\approx f(\text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ti/Nb:C})$),
- odlišným permeačním chováním a úrovní zkřehnutí oceli difuzibilním vodíkem.

Na šíření defektů se mohou podílet i jevy podmíněné deformovatelností oceli, tvořící přechodovou oblast. Nejvyšší mechanické vlastnosti lze očekávat v oblasti s vyšším naředěním a současně zvýšeným obsahem uhlíku, popř. ve vrstvě karbidů, nejnižší naopak v oduhličené oblasti na přechodu nepromíšené oblasti a oblasti přechodové. Při deformaci dojde k maximální deformaci v oduhličené oblasti oceli a prasknutí vysokoteplotního oxidu nebo ve vytvrzených oblastech naopak může dojít nejprve k prasknutí v této oblasti a poté poškození oxidu na jejím povrchu. Opakování tohoto děje je příčinou tzv. rušené vysokoteplotní oxidace a intenzivnějšího úbytku kovu, popř. stabilního šíření defektu. Jiným způsobem se mohou odlišné mechanické vlastnosti oceli v přechodové oblasti projevit, při ovlivnění oceli atomárním vodíkem. V části přechodové oblasti, kde se vyskytuje struktura feriticko-perlitická, zákalné struktury a jejich rozpadové produkty, může dojít k lokálnímu zkřehnutí těchto oblastí atomárním vodíkem. Malá množství vodíku mohou do materiálu vstoupit při reduktivním rozkladu vody (poměrně nízká intenzita) a při vysokoteplotní oxidaci. Intenzita zkřehnutí je úměrná pevnosti / tvrdosti zákalné oblasti a limitní pro svař je hodnota HV 350, kdy dochází k praskání těchto oblastí za účasti vodíku v neutrálním vodním prostředí, či již ve vlhké atmosféře ($RH > 80 \%$) v případě extrémně vytvrzených oblastí, HV 500. Vliv vodíku se může projevit i na interakci se specifickými segreganty, nejvýrazněji se segregovanou sírou a to i ve vysoce legované oblasti SK. Galvanický účinek ve spoji, se uplatní jen v případě aktivace uhlíkové oceli, její intenzivnější koroze, v blízkosti hranice ztavení či při iniciaci defektu netypického vlivem segregčních projevů ve svarovém kovu. Ke stabilnímu šíření defektu v UO je však nutná přítomnost oxidovadla (typicky O_2 , při teplotách do $130^\circ C$) nebo více cyklů tzv. rušené vysokoteplotní oxidace (při teplotách nad $160^\circ C$ – avšak bez vlivu galvanického kontaktu). Pro nestandardní šíření defektu, urychlené případně galvanickým účinkem, je nutné odhalení citlivé hranice zrna, bohaté segreganty, zejména P, S vodnému prostředí a četnější deformace této oblasti; galvanický vliv vyvolaný aktivní hranicí zrna a pasivními povrchy obou typů ocelí se projeví rovněž významněji za účasti kyslíku.

Příčiny vzniku lokalizovaného poškození materiálů HSS

Obecnou příčinou vzniku lokalizovaných poruch stimulovaných prostředím, je existence či tvorba heterogenit v systému materiál – prostředí, a to jak na straně materiálu, tak na straně prostředí. V systému „heterogenní svar – prostředí“, je většina materiálových heterogenit vytvořena během svařování tavným procesem a ohřevem okolního materiálu. Tyto heterogenity mohou být účinné při iniciaci i šíření defektu po hranici ztavení. Kromě potenciálních inherentních cest šíření defektu, může být ze strany materiálu vneseno do systému vnější mechanické namáhání, způsobující uplatnění některé z přítomných heterogenit a být tak příčinou podkritického stabilního růstu defektu, jehož rychlost může být ovlivněna dílčími lokálně nestabilními postupy defektu. Odlišná povaha heterogenit na straně materiálu může být příčinou, že se jako činné cesty šíření mohou uplatnit v různých provozních / zátěžových režimech a dojde tak k etapovitému postupu defektu stěnou komponenty. Materiálové heterogenity, které mohou mít typické uspořádání podle tvaru svarového spoje, např. podél hranice ztavení, mohou být činné jako cesty usměrněného šíření defektu a mohou se vyskytnout jak v oceli uhlíkové, ovlivňující poškození typické, tak i oceli korozivzdorné, při poškození netypickém. Na straně prostředí jsou heterogenity generovány během všech provozních režimů, nejvýrazněji se uplatní při změně fyzikálně – chemických podmínek pracovního prostředí JE. Jedná se o objemy přechodné kondenzace (tvorba prvního kondenzátu), erozně korozní, popř. kavitační účinek kondenzující páry, objemy odparu (tvorba zahuštěného prostředí) apod. Tyto heterogenity jsou typické v prostředí sekundárního okruhu, v okruzích chladicích vod nebo během nekorektní odstávky. Vliv heterogenit na straně prostředí na materiály heterogenního spoje může být odlišný, přičemž největší riziko intenzifikace korozního procesu lze předpokládat na uhlíkovou. K typickému

poškození, lokální aktivaci uhlíkové oceli, s více či méně rozsáhlou korozí uhlíkové oceli, tedy dojde:

- vlivem heterogenit prostředí (vodného či plynného), které se projevují kyslíkovými články, stíněnými objemy, zahuštěným prostředím v režimech $t < 130\text{ }^{\circ}\text{C}$; heterogenity prostředí vznikají během provozu a dojde při nich k odklonu od standardního vodního režimu; dojde k lokální či celkové aktivace UO; jejich vzniku nelze zcela zamezit, ale lze ovlivnit agresivitu prostředí, četnost a celkovou délku trvání;
- za účasti heterogenit na straně materiálu, i za korektních podmínek na straně prostředí, vlivem deformace heterogenity deformačně – pevnostní: a) v TOO uhlíkové oceli, tj. od hranice ztavení přes celou oblast tepelného ovlivnění uhlíkové oceli; v tomto případě je šíření defektu doprovázeno i intenzivnější a rozsáhlejší korozí oceli uhlíkové; vliv deformace může být řídícím v podmínkách vysokoteplotní oxidace, kdy může dojít k přímému poškození oxidu na povrchu oceli, či po primárním nestabilním lomu základné struktury či zkřehlé oblasti v oceli – opakování tohoto procesu vede k šíření defektu narušovanou vysokoteplotní oxidací; na podmínkách prostředí je tento typ napadení nezávislý; b) podél hranice ztavení, v místě intenzivních segregčních projevů na hranici zóny částečného natavení, kde dojde k nestabilnímu lomu (prasknutí) bez intenzivnější koroze okolí.

Tab. 1: Heterogenity materiálů jako potenciální místa iniciace či cesty šíření defektu v TOO nelegované oceli nebo ve svarovém kovu

Cesta, [povaha heterogenity]:	Projev:
SK: Stopy nelegované oceli ve svarovém kovu – podél hranice ztavení WI, (tzv. podtavení), [C].	→ Snazší aktivace pasivního povrchu, intenzivnější koroze ($\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2$) a VT oxidace oceli (dle obsahu Cr).
UO, SK: Vytvrzené, základné oblasti, [C, S].	→ Lokální „prasknutí“ oblasti při deformaci (snížená houževnatost, možný vliv $H_{AT} \Rightarrow$ lokálně nestabilní lom).
UO: Oduhličené oblasti, závary UO, [C, S].	→ Vyšší poddajnost $\Rightarrow$ praskání VT oxidu $\Rightarrow$ intenzivnější růst oxidu rušenou oxidací.
SK: Karbidické pásmo v hranici ztavení, [C, S].	→ Prasknutí při zatížení (lokálně nestabilní lom).
Vnitřních necelistvostí, nekomunikujících s povrchem. SK: „horké“ trhliny, póry, [S, I], UO: „studené“ trhliny, [S].	→ Nestabilní „poskok“ šířícího se defektu (překlenutí vnitřní vady). SK: V případě volných dilatací svaru, mohou místa segregace být zdrojem autonomního šíření defektu.
SK: Snížená pevnost hranic zrn – segr. projev při tuhnutí a následném chladnutí, [C, S]. UO: Segregace podél hranice ztavení v UO, [C, S].	→ Možnost autonomního stabilního postupu defektu. Segregací stimulované praskání.

SK : svarový kov

VT : vysokoteplotní (oxid)

UO : uhlíková ocel

TZ : tranzitní oblast

[C, S, I] : heterogenita kompoziční, napěťová – deformační – kontinuální

Příklady vnesených a vzniklých heterogenit:

- [C] – kompoziční: a) kontakt oblastí odlišného složení, naředění, podtavení, na-/oduhičení, segregace, b) proměnné fázové složení A – A/D – A/F – F/M – M, karbidy, základné oblasti,
- [I] – kontinuální: trhliny, póry, oxidické pleny, [S] - pevnostní – deformační.

K netypickému poškození SK dojde účinkem heterogenit materiálu při odhalení inherentních cest vodnému prostředí (tab. 1). Primární příčinou vzniku těchto aktivních materiálových heterogenit je použití přídavného kovu s vysokou stabilitou austenitické fáze. Při vzniku netypického poškození, je UO i KO (základní materiál i SK) ve stavu pasivity, či vysokoteplotní pasivity.

Literatura

- [1] Junek, L., Bystrianský, J., Diviš, V., Ernestová, M., Haušild, P., Janovec, J., Junek, M., Kuboň, Z., Matocha, K., Siegl, J. (2019): *Pracovní materiály skupiny hodnotící vznik poruch heterogenních svarových spojů JE VVER 440 / 1000*. Pracovní materiály do 06/2019, koordinace Junek, L.
- [2] Arkadov, G. V., et al. (2010): *Razrabotka i obosnovanie dopustimych v ekspluatacii rozmerov nesploschnostej svarnykh schvov No 23 patrubkov Du 1100 PGV440*.
- [3] Žbannikov, V. V., Prytkov, A. N., Slivkin, T. P. (2010): *Ocenka sostojanija osnovnogo metalla i metalla svarnykh soediněnij parogeneratorov RU VVER-440 pervogo pokolenija za 37-letnij period ekspluatacii na Novovoronežskoj AES*.
- [4] Khodakov, V. D., Bazanov, M. A., Zubčenko, A. C. (2010): *Remont s ispolzovanim svarki uzla privarki kollektorov teplonositelja k patrubkam DU 1100 korpusov parogeneratorov VVER-440 posle dlitelnoj ekspluatacii*.
- [5] Bystrianský, J., Salvetr, P., Bystrianský, V., Návoj, A., Děd, J., Maixner, J., Cibulková, J., Kohoutková, M., Randáková, S. (2017): *Vliv heterogenit chemického složení vysoce legovaných ocelí na jejich chování ve vodě vysokých parametrů. Vnitřní projekt ÚKMKI VŠCHT Praha. I. Detekce inherentní cesty šíření poškození po hranicích zrn v tranzitní oblasti a svarovém kovu*. Zpráva, VŠCHT Praha, Praha.
- [6] Bruemmer, S. M., Was, G. S. (1994): *Microstructural and microchemical mechanisms controlling intergranular stress corrosion cracking in light-water-reactor systems*. Journal of Nuclear Materials, Vol. 216, pp. 348-363. ISSN 0022-3115
- [7] Khodakov, V. D., Khodakov, D. V. (2015): *Welding features of the equipment and piping of a NPP from perlitic and austenitic steels*. Svarocnoe proizvodstvo, Vol. 11, pp. 10-16.
- [8] Khodakov, V. D., Khodakov, D. V. (2015): *The nature and mechanism of heterogeneous welded joints formation for nuclear energy equipment from austenitic and perlitic steels*. Svarocnoe proizvodstvo, Vol. 2, pp. 3-9.
- [9] Вальд, Е. М. (2017): *Опыт эксплуатации композитных сварных швов на действующих АЭС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000*. 24. 1. 2017.

CHARAKTERIZACE HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

CHARACTERIZATION OF DISSIMILAR METAL WELDS

Jaroslav Čech ^{a)}, Petr Haušild ^{a)}, Jan Siegl ^{a)}, Lubomír Junek ^{b)}, Miroslava Ernestová ^{c)} a Jaroslav Bystrianský ^{d)}

^{a)} ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra materiálů, Trojanova 13, 120 00 Praha

^{b)} Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Resslova 972/3, Veveří, 602 00 Brno

^{c)} ÚJV Řež, a.s., Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

^{d)} Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Technická 5, 166 28 Praha

Abstrakt

V příspěvku je studován heterogenní svarový spoj potrubí z uhlíkové a austenitické ocele. Ve svařeném potrubí byly na rozhraní základní materiál – svarový kov nalezeny trhliny, které vznikly a šířily se mechanismem korozního praskání. Trhlina se šířila podél linie ztavení v oblasti promísení obou kovů. V této oblasti byly identifikovány změny v chemickém složení a základné struktury s výrazně vyšší tvrdostí oproti svařovaným kovům.

Abstract

Heterogeneous dissimilar metal welds of carbon and austenitic stainless steel used in the piping systems were studied in this paper. The cracks were found in the welded pipeline at the interface between the base carbon steel and austenitic filler material. The stress corrosion cracking was identified as the cracking mechanism. The crack propagated along the fusion line in the mixing zone (area with higher diffusion) of both metals. In this area, changes in chemical composition and quenching structures with significantly higher hardness compared to the base metals were identified.

Úvod

Heterogenní svarové spoje uhlíkových a austenitických ocelí patří mezi kritická místa potrubí vystavená agresivnímu korozivnímu prostředí, kde může docházet ke vzniku a rozvoji trhlin [1, 2]. Rozdílné mechanické, fyzikální (teplotní roztažnost) a elektro-chemické vlastnosti mohou vést k problémům jak již během svařování, tak během provozu zařízení. Na rozhraní může docházet ke vzniku a rozvoji trhlin, které, v limitním případě, mohou vést až k vynucené odstávce zařízení a jeho opravě. V příspěvku jsou popsány mikrostrukturní a mechanické vlastnosti heterogenních svarových spojů a mechanismus vzniku a šíření trhlin podél rozhraní uhlíková ocel – svarový kov.

Materiál a metody

Ke svaření uhlíkové oceli 12022.1 a austenitické oceli 08Ch18N10T byly použity svarové kovy Sv-10Ch16Ni25AM6 a Sv-07Ch25N13. Použití svarového kovu Sv-07Ch25N13 s vyšším obsahem chromu by mělo vést ke zvýšení množství žádoucího δ -feritu.

Mikrostruktura na rozhraní uhlíková ocel – svarový kov byla zdokumentována pomocí světelného (Neophot 32) a řádkovacího elektronového mikroskopu (JSM 5510LV) s energiově disperzním analyzátozem rentgenového záření IXRF 500 pro určení chemického složení. Zvýšená pozornost byla věnována změnám tvrdosti v blízkosti přechodu uhlíková ocel – svarový kov. Měření tvrdosti bylo provedeno technikou instrumentované indentace dle normy ČSN EN ISO 14577 (Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů) [3] na přístroji Anton Paar CSM NHT vybaveným Berkovičovým indentorem. Výsledky ve formě zatěžovacích křivek síla-hloubka vtisku byly zpracovány metodou Oliver-Pharr [4] k získání tvrdosti HV_{IT} . Velikost maximálního zatížení $P_{max} = 5$ mN byla zvolena na základě před-

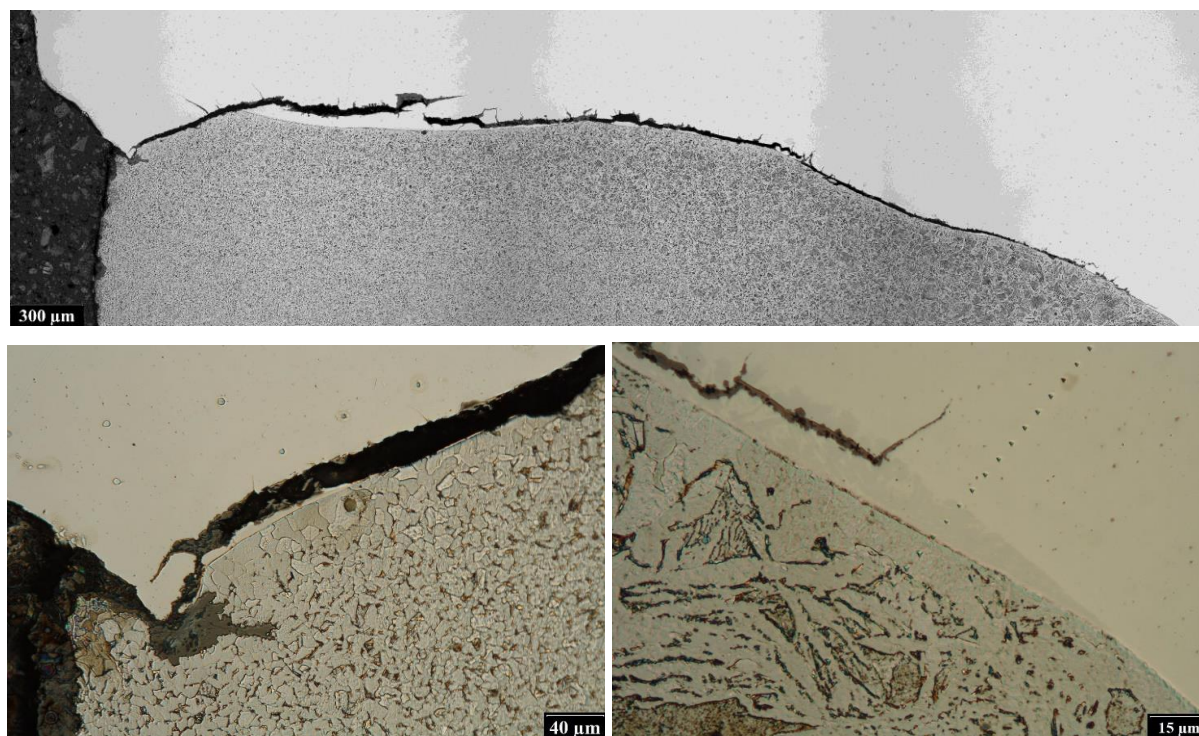
chozích experimentů, aby byla dosažena optimální přesnost a prostorové rozlišení měřeného profilu. Vzdálenost mezi okraji jednotlivých vtisků byla zvolena 5 μm tj. více než dvacetinásobek maximální hloubky vtisku, aby nedošlo k ovlivnění jednotlivých měření.

Mikrostruktura a měření tvrdosti

Tepelně ovlivněná zóna v základní uhlíkové oceli dosahovala do vzdálenosti cca 1-2 mm od rozhraní se svarovým kovem. Mikrostruktura a trhlinka v oblasti přechodu uhlíková ocel – svarový kov je na obr. 1. Mikrostruktura uhlíkové oceli se měnila z ferito-perlitické v blízkosti prvního průchodu (první housenka v kořeni svaru) na strukturu Widmanstattenova feritu postupně s rostoucí vzdáleností od kořene svaru ve směru k vnější straně trubky. Mikrostruktura se lišila i podél rozhraní základní materiál – svarový kov podle toho, jak intenzivně probíhala tepelná výměna mezi základním materiálem a roztaveným svarovým kovem při tvorbě svarového spoje (velikost zrna základního materiálu klesala směrem od rozhraní mezi základním materiálem a svarovým kovem a zároveň rostla podél rozhraní od vnitřní stěny trubky směrem k vnějšímu povrchu).

Při tvorbě svarového spoje docházelo k promíšení základního materiálu a materiálu svarového kovu. To se projevovalo v nehomogenitě mikrostruktury i chemického složení podél rozhraní i ve vlastní linii ztavení (profil chemického složení hlavních legujících prvků přes rozhraní je na obr. 2). Docházelo ke vzniku zákálných struktur (resp. shluků vyloučených karbidů) podél rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem 12022.1.

Použití svarového materiálu Sv-07Ch25N13 vedlo k výskytu mezidendritických fází (podle složení přídatného materiálu pravděpodobně hlavně delta feritu), které byly pozorovány v oblastech průchodu 2. a 3. housenky.



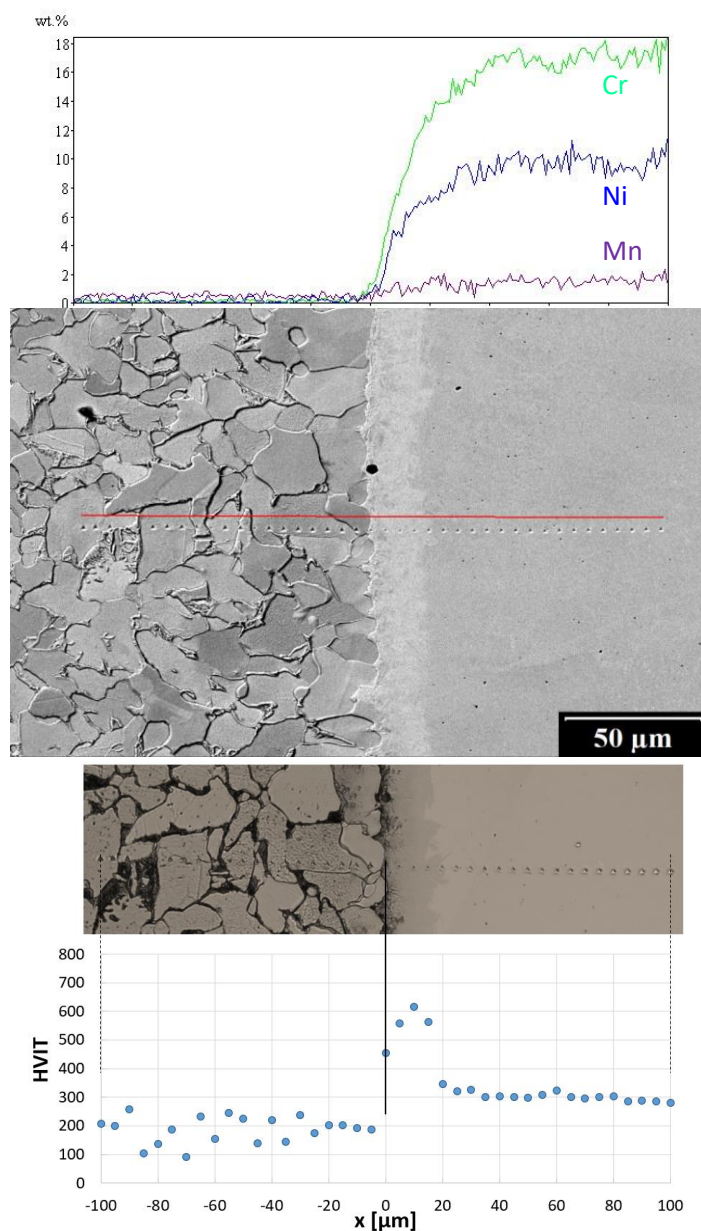
Obr. 1: Mikrostruktura v blízkosti přechodu uhlíková ocel – svarový kov

Příklad profilu tvrdosti přes rozhraní uhlíková ocel – svarový kov je na obr. 2 a obr. 3. Mikrotvrdost uhlíkové oceli se pohybovala okolo hodnoty 200 HV_{IT} . Tvrdost svarového kovu byla přibližně 300 HV_{IT} pro oba přídatné materiály. V oblasti přechodu základní kov – uhlíková

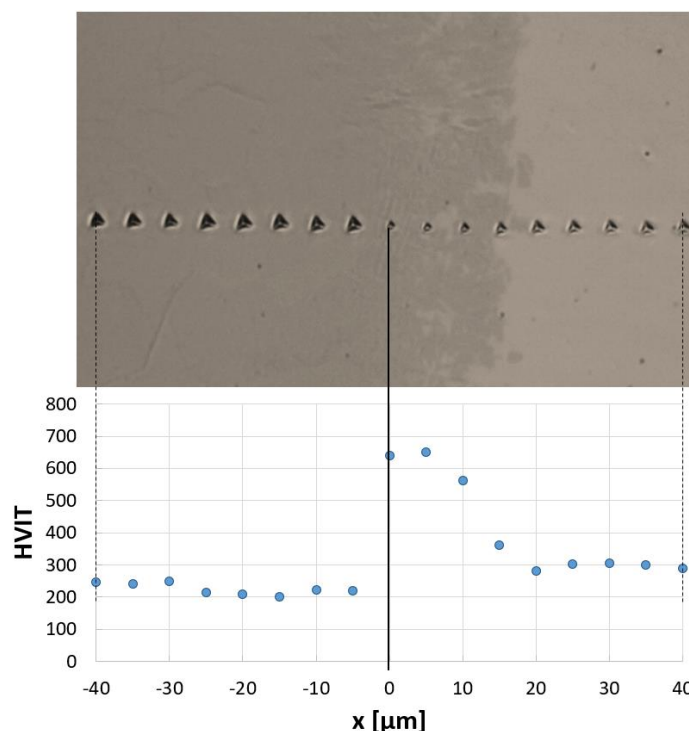
ocel, v oblasti vzniku zákalných struktur podél linie ztavení, došlo k výraznému zvýšení tvrdosti až na dvojnásobek hodnoty svařovaných materiálů (obr. 2 a obr. 3).

Vznik a šíření trhlin

V místě vzniku trhliny byl identifikován korozní důlek, který působil jako koncentrátor napětí a vedl k iniciaci trhliny. Trhlina se šířila podél rozhraní základní materiál – svařový kov převážně mechanismem interkrystalické dekoheze. Bylo prokázáno, že k iniciaci a šíření trhlín došlo mechanismem korozního praskání resp. koroze pod napětím. Na lomových plochách nebyly nalezeny žádné znaky (striace, postupové čáry atd.), které by prokazovaly podíl únavových mechanismů na rozvoji trhliny v heterogenních svarech. Mezi trhlinou a základním materiálem byly místy patrné zbytky svařového kovu se zvýšenou tvrdostí, tj. trhlina se šířila podél linie ztavení po okraji shluků vyloučených karbidů resp. zákalných struktur (obr. 1).



Obr. 2: Profil chemického složení a tvrdosti na rozhraní uhlíková ocel 12022.1 – svařový kov Sv-07Ch25N13



Obr. 3: Profil tvrdosti na rozhraní uhlíková ocel 12022.1 – svarový kov Sv-10Ch16Ni25AM6

Závěr

Z provedených analýz vyplývá, že ke vzniku a šíření trhlin podél rozhraní uhlíková ocel – svarový kov dochází mechanismem korozního praskání. Trhliny se šíří podél linie ztavení v místě výskytu zákalných struktur (resp. shluků vyloučených karbidů) s výrazně vyšší tvrdostí. Volba svarového kovu neměla na mikrostrukturu a šíření trhliny výrazný vliv. Pro zamezení vzniku a šíření trhlin se jako nejvhodnější varianta jeví zamezení styku korozního prostředí s rozhraním uhlíková ocel – svarový kov, které je možné provést například galvanickým poniklováním ohrožené oblasti.

Poděkování

Práce byla podpořena v rámci projektu TK01030108 (TA ČR).

Literatura

- [1] Haušild, P., Siegl, J. (2018): *Analýza příčin porušení HSS na výřezu potrubí superhavarijního napájení PG 23 EDU*. Výzkumná zpráva, V-KMAT-1034/18, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze, Praha.
- [2] Haušild, P., Siegl, J. (2018): *Analýza HSS s galvanicky nanesenou vrstvou niklu*. Výzkumná zpráva, V-KMAT-1048/18, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze, Praha.
- [3] ISO (2002): *ISO 14577: Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and material parameters*.
- [4] Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992): *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. Journal of Materials Research, Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583. ISSN 0884-2914

EXPOZICE HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ PROSTŘEDÍ VODY SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU

EXPOSURE OF DISSIMILAR METAL WELDS TO SECONDARY WATER ENVIRONMENT

Martin Vojna ^{a)}, Miroslava Ernestová ^{a)}, Dana Tonarová ^{a)}, Lubomír Junek ^{b)}, Jaroslav Bystrianský ^{c)}, Petr Haušild ^{d)}, Jan Siegl ^{d)} a Zdeněk Čančura ^{e)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.

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

^{d)} Katedra materiálů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze

^{e)} ČEZ, a. s.

Abstrakt

Tento příspěvek uvádí výsledek dlouhodobé expozice heterogenních svarových spojů (HSS) teplotním cyklům v prostředí sekundárního okruhu jaderné elektrárny (JE) typu VVER. Zkoušené vzorky HSS se skládaly z uhlíkové a austenitické korozivzdorné oceli. Část vzorků byla opatřena Ni ochrannou vrstvou. Část vzorků byla v přípravcích zatížena třibodovým ohybem pomocí speciálně vyrobených přípravků.

Abstract

This text presents results of long-term exposure of dissimilar metal welds (DMW) to heat cycles in VVER secondary water environment. Tested DMW were made of carbon and austenitic stainless steel. Some samples were covered by Ni protective layer. Some samples were under three-point bend load.

Úvod

HSS představují kritické místo každého zařízení. Jedním ze způsobů, jak zvýšit životnost HSS, je ochrana kořene svaru povrchovou úpravou.

Problematickou HSS, zejména stanovením příčiny poškození a způsobem ochrany kořene HSS, se zabývá expertní skupina složená ze zástupců organizací ČEZ, KMAT FJFI, ÚAM, ÚJV a VŠCHT.

Cílem prezentovaného experimentálního programu je ověřit, jak HSS odolá teplotním cyklům v prostředí vody vysokých parametrů při různých způsobech ochrany kořene. Příspěvek se zaměřuje na vzorky pokryté niklovou ochrannou vrstvou a srovnání se vzorkem bez vrstvy.

Experiment

Materiál

Pro testování vzorků byly zvoleny dva stavy: stav A – pouze expozice vzorku v prostředí, stav B – zatížený vzorek třibodovým ohybem a expozice v prostředí. Celkem byly hodnoceny 4 nezatížené vzorky (stav A) a 2 zatížené vzorky (stav B). V příspěvku je uvedeno hodnocení jednoho vzorku stavu A s Ni ochrannou vrstvou a 2 vzorků stavu B.

Testované HSS jsou z uhlíkové oceli (UO) a austenitické korozivzdorné oceli (AKO) spojených svařem z austenitického svarového kovu (SK). Výroba vzorků byla provedena výřezem z dostupných trubkových polotovarů s HSS. Jeden typ vzorků byl z vnitřní strany trubky galvanicky poniklován. Konečné rozměry zatížených vzorků jsou 48x10x6 mm dle [1]. Na výšku 6 mm byly obrobena z vnější strany trubky (od koruny svaru). Rozměry nezatížených vzorků jsou dány zbývajícím materiálem po výřezu zatížených vzorků. Řezné hrany vzorků byly poťeny koncentrovanou kyselinou dusičnou, opláchnuty a vysušeny.

Parametry

Teplotní cykly probíhaly v rozmezí teplot 70–300 °C. Délka jednoho cyklu byla cca 17 h s rychlostí ohřevu 44 K/h a rychlostí chlazení 21 K/h. Dohromady proběhlo celkem 100 cyklů rozdělených do tří fází 1–20, 21–40 a 41–100 cyklů. Před začátkem každé fáze bylo vyměněno médium a zvýšeno napětí na vzorcích stavu B.

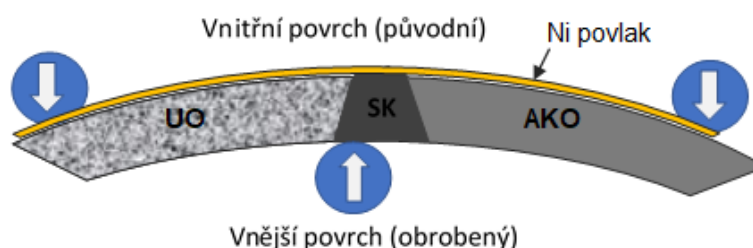
Prostředí

Pro experiment byl použit statický, neprůtočný autokláv 3-AV-05 (ARPO a.s. Praha, vč. 407833) o vnitřním objemu 4,5 l, max. teplota 320 °C, max. tlak 15 MPa. Během testu byly zaznamenávány teplota a tlak v autoklávu.

Byla použita simulovaná odluhová voda parogenerátoru JE typu VVER 440 (vodivost <20 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se zvýšeným obsahem kyslíku (0,2–0,3 ppm) na počátku testu a při zahájení každé další etapy testu; koncentrace chloridů $\text{NH}_4\text{Cl} = 3 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, pH 8–9.

Zatížení vzorků

Zatěžování vzorků tříbodovým ohybem bylo provedeno zatížením vzorku v přípravku před expozicí podle [2] (obr. 1). Velikost napětí byla na základě doporučení VŠCHT zvolena mírně nad mezí kluzu UO. Aplikované napětí v každé fázi testu je v tab. 1.



Obr. 1: Schéma zatížení vzorků stavu B

Tab. 1: Aplikace zatížení vzorků stavu B

Etapa experimentu	Teplotní cykly	Aplikované napětí σ [MPa]
1.	1. až 20. cyklus	≈ 140
2.	21. až 40. cyklus	≈ 155
3.	41. až 100. cyklus	≈ 170

Metodika hodnocení

Základní obrazová dokumentace byla pořízena fotoaparátem Nikon D5300.

Metalografický výbrus strany HSS byl připraven standardním způsobem, tj. mechanickým broušením na metalografických papírech o zrnitosti 500–2400 a leštěním pomocí diamantové pasty (zrnitost D 3 a D 1) a koloidní siliky (OPS Struers).

Struktura materiálu UO byla vyvolána chemicky v 2% Nitalu, struktura SK a AKO byla vyvolána elektrolyticky v 10% kyselině šťavelové.

Hodnocení mikrostruktury bylo realizováno pomocí světelného mikroskopu (SM) Nikon Eclipse MA200 s využitím obrazové analýzy v programu NIS – Elements AR 5.11.

Obrazová dokumentace v sekundárních (SE) a zpětně odražených elektronech (BSE) byla pořízena na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) VEGA TS 5130 XM (Tescan Brno a.s.). Semikvantitativní analýzy byly provedeny na analyzátoru INCA Energy 350 (polovodičový křemíkem driftovaný detektor (SDD) X-Max 80 mm^2 , chlazený Peltierovými články) fy. Oxford Instruments, připojený na SEM s řídicím softwarem AZtec verze 3.1. Použitá energie primárních elektronů byla 20 keV.

Výsledky

Hodnocení galvanicky pokovených vzorků s niklovou vrstvou bylo zaměřeno na přilnavost vrstvy v průběhu experimentu, a to zejména na rozhraní UO-SK. Hodnocení vzorků bez niklové vrstvy bylo zaměřeno na dokumentaci stavu HSS (rozhraní UO-SK a kořen SK) po expozici.

Galvanicky pokovené vzorky měly v původním stavu Ni vrstvu již částečně oddělenou z austenitické strany. Míra oddělení niklové vrstvy se mezi vzorky lišila, nicméně delaminace končila na úrovni austenitické oceli před SK. Niklová vrstva tedy stále chránila SK i UO.

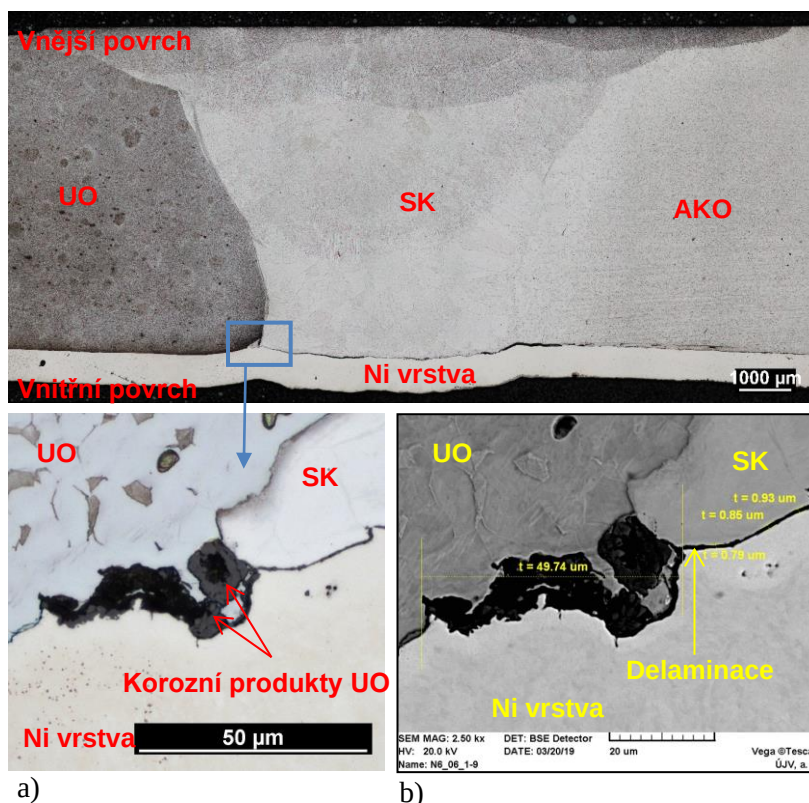
Na nezatíženém vzorku nebylo po expozici na vnitřní straně patrné poškození v porovnání s výchozím stavem.

Vzorek s Ni vrstvou, zatížený

U zatíženého vzorku s Ni vrstvou došlo po 100 teplotních cyklech ze strany 1 (obr. 2) vzorku k šíření delaminace podél SK až k rozhraní UO-SK. Na straně 2 vzorku také došlo k šíření delaminace, ale v tomto případě se zastavila ještě před SK.



Obr. 2: Popis částí vzorků z vnitřní strany trubky



Obr. 3: Detail rozhraní UO-SK-Ni, vzorek s Ni vrstvou, zatížený, po 100 teplotních cyklech.

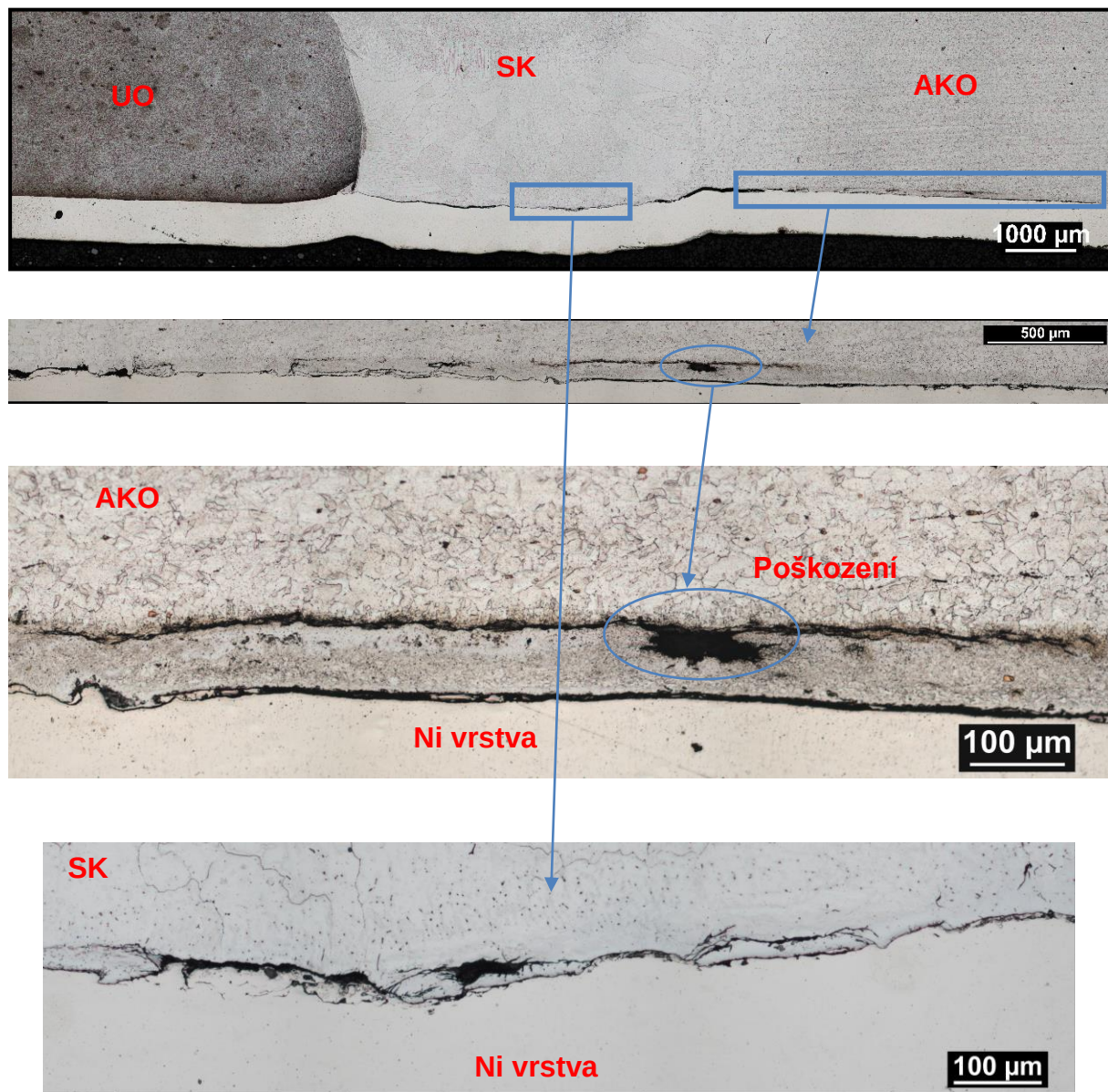
a) SM, zvětšení 500x, b) SEM BSE

Na snímcích ze SM bylo zřetelné, že delaminace na straně 1 se šířila až do blízkosti rozhraní UO-SK. Na detailních snímcích jsou rozeznatelné korozní produkty na rozhraní UO-SK (obr. 3a). To znamená, že během experimentu se zkušební médium dostalo pod Ni vrstvu na

základní materiál, kde došlo k anodickému rozpouštění UO. Toto bylo ověřeno také SEM (obr. 3b).

Ve SK a AKO jsou v blízkosti Ni vrstvy poškození typu dutin (obr. 4). V dutině SK se nachází porézní agregát korozních produktů.

U rozhraní AKO a niklu je zřetelná oblast s deformovanou strukturou (obr. 4). Tato oblast proměnné tloušťky cca 100 μm vznikla poblíž rozhraní SK-AKO a vyskytuje se podél rozhraní AKO-Ni. Deformovaná/nedeformovaná oblast se liší velikostí zrna, v deformované oblasti jsou patrna lokální poškození kopírující hranice zrn.



Obr. 4: Poškození SK a AKO zatíženého vzorku s Ni vrstvou, leptáno, zvětšení 50x, 50x, 200x, 200x

Vzhledem k tomu, že tato poškození typu dutin ve SK, stejně jako poškození typu dutin a deformovaná oblast v AKO podél rozhraní AKO-Ni, nejsou zřetelná na snímcích materiálu před expozicí, je pravděpodobné, že tato poškození vznikla působením napětí a prostředí během experimentu a byla proto pozorovatelná až po ukončení 100 teplotních cyklů.

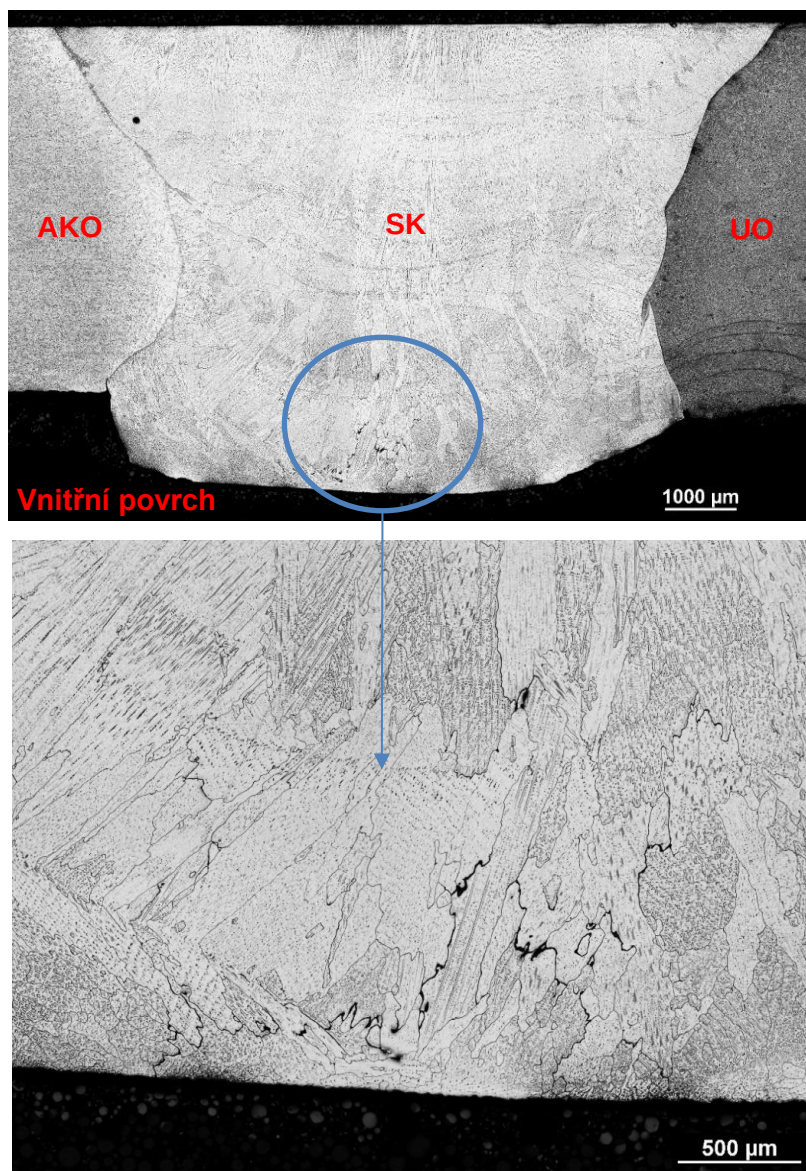
Vzorek bez niklové vrstvy, zatížený

Hodnocení pomocí SM a SEM vzorku bez Ni vrstvy bylo zaměřeno na vady u rozhraní ZM-SK a ve SK.

Porovnáním stavu vzorku před a po expozici je patrné, že na rozhraní UO-SK se vyskytovaly defekty již před expozicí v autoklávu.

Dokumentace vzorku po expozici v autoklávu pomocí SM byla provedena v 5 řezech. Pro srovnání byly hodnoceny dva řezy na vzorku, který nebyl exponován v autoklávu.

Ve SK vzorku po expozici se na většině hodnocených řezů v kořeni SK vyskytovaly vady typu shluk trhlin (obr. 5).



Obr. 5: Shluk trhlin v kořeni SK, zatížený vzorek bez Ni vrstvy, leptáno

Trhliny ve SK byly pokryty tmavě zbarvenými úsadami a byly propojeny s vnitřním povrchem. Po naleptání SK je patrné, že se trhliny šířily interkrystalicky po hranicích zrn SK nebo lokálně po hranicích dendritů. Na vzorku po expozici byla na vnitřním povrchu SK patrná iniciační místa trhlin v kořeni SK.

Vzhledem k tomu, že v kořeni SK neexponovaného vzorku se nevyskytovaly žádné trhliny, trhliny v kořeni SK exponovaného + zatíženého vzorku pravděpodobně vznikly během expozice v autoklávu mechanismem SCC (koroze pod napětím).

Závěr

Vzorky HSS byly hodnoceny po expoziční a expoziční + zatěžovací zkoušce v simulované odluhové vodě parogenerátoru JE typu VVER 440 po 100 teplotních cyklech (70-300 °C).

Na vzorku exponovaném bez zatížení nebylo zřetelné žádné poškození (např. trhliny, nebo dutiny).

Na zatíženém vzorku s Ni vrstvou, kde již ve výchozím stavu vrstva vykazovala nepřilnutí k AKO, došlo po 100 teplotních cyklech k šíření delaminace z austenitické strany až na kritické rozhraní UO-SK (výskyt produktů koroze uhlíkové oceli). U nezatíženého vzorku šíření delaminace nebylo pozorováno.

Porušení soudržnosti Ni vrstvy a povrchu AKO bylo patrné již před expoziční + zatěžovací zkouškou. Tato zkouška prokázala jeho další šíření, přičemž příčinu vzniku delaminace nebylo možné objasnit.

Dále bylo na zatíženém vzorku s Ni vrstvou pozorováno (1) poškození typu dutin ve SK, (2) oblast s deformovanou strukturou AKO podél rozhraní AKO-Ni a poškození typu dutin v AKO.

Na zatíženém vzorku bez Ni vrstvy došlo během expozice ke vzniku interkrystalických trhlin v kořeni SK. Tyto trhliny pravděpodobně vznikly během expozice v autoklávu mechanismem SCC (koroze pod napětím), neboť nebyly nalezeny na neexponovaných vzorcích ze stejného HSS.

Vzhledem k tomu, že tyto trhliny nejsou zřetelné na snímcích ve zprávě [3] zabývající se zcela stejným materiálem před expoziční + zatěžovací zkouškou, je pravděpodobné, že trhliny vznikly působením napětí během experimentu.

Závěrem lze konstatovat, že nedokonale přilnutá niklová vrstva k HSS může vést s provozem k šíření delaminace a je tedy nevyhovující z pohledu ochrany rozhraní UO-SK před provozním médiem. Galvanické niklování provedené na korektním povrchu (Ni vrstva zcela přiléhá k povrchu před provozem) je dostačující pro ochranu kořene HSS [4].

Literatura

- [1] ÚNMZ (2010): *ČSN EN ISO 5173 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem*. ÚNMZ, Praha. ICS 25.160.40.
- [2] ASM (2003): *ASM Handbook Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, Materials Park, Ohio. ISBN 978-0-87170-705-5
- [3] Tonarová, D., Ernestová, M., Tomek, L. (2019): *Hodnocení heterogenního svarového spoje s niklovou vrstvou na vnitřním povrchu*. Technická zpráva, DITI 2302/587 Rev.1, ÚJV Řež, a. s., Husinec-Řež.
- [4] Ernestová, M., Tonarová, D., Tomek, L. (2019): *Experimentální program na hodnocení niklování*. Technická zpráva, DITI 2302/614 Rev. 0, ÚJV Řež, a. s., Husinec-Řež.

VLIV TVÁŘENÍ NA MECHANICKÉ A CREEPOVÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÝCH OCELÍ

INFLUENCE OF FORGING ON MECHANICAL AND CREEP PROPERTIES OF MARTENSITIC STEEL

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

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

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

Abstrakt

V rámci ověřování výrobní technologie byl na martenzitických ocelích P91 a P92 studován vliv tváření na mechanické a creepové vlastnosti. Z ingotů obou materiálů byly vykovány osazené hřídele o různém průměru. Stupeň prokování se pohyboval od $P_k = 3$ do $P_k = 13$ v případě oceli P91 a od $P_k = 11,6$ do $P_k = 24,2$ u oceli P92. Výsledky byly získány při spolupráci společností SVÚM a.s. a ŽĐAS a.s. za podpory TA ČR.

Abstract

The influence of forming on mechanical and creep properties was studied on the P91 and P92 martensitic steels as part of the verification of production technology. Shoulder shafts of different diameters were forged from ingots of both materials. The degree of forging varied from $P_k = 3$ to $P_k = 13$ for P91 and from $P_k = 11,6$ to $P_k = 24,2$ for P92. The results were obtained in cooperation with SVÚM a.s. and ŽĐAS a.s. with the support of TA ČR.

Úvod

Součástí ověřování výrobní technologie žárovevných ocelí X10CrMoVNb91 (P91) a X10CrWMoVNb92 (P92) bylo ověřování vlivu stupně prokování na krátkodobé i dlouhodobé mechanické vlastnosti těchto ocelí. V případě P91 byl ke studiu použit materiál tavby 40529, u oceli P92 pak tavba 57448, jejichž chemická složení jsou uvedena v tab. 1 a v tab. 2 [1]. Stupně prokování (P_k) byly u oceli P91 $P_k = 3$ až 13, u oceli P92 bylo $P_k = 11,6$ až 24,2. Na takto zpracovaných materiálech byly studovány krátkodobé mechanické a žárovevné vlastnosti. Výsledky studia jsou podrobně popsány ve zprávách [2], [3].

Experimentální materiál

U oceli P91 byl ke studiu použit zkušební ingot o hmotnosti 4350 kg, který byl na hydraulickém lisu tvářen v rozmezí teplot 1200–950 °C. Stupeň prokování byl $P_k = 3$ a více. Z teploty tváření byl materiál ochlazován řízeným způsobem a pak tepelně zpracován postupem 1050 °C/olej + 760 °C/vzduch. Poté byl materiál ohrubován a byly provedeny ultrazvukové a magnetické zkoušky. Ty prokázaly, že v materiálu nejsou defekty. Z vytvořených stupňů prokování ($P_k=3$; 5,25 a 13) byly odebrány vzorky pro krátkodobé mechanické a creepové zkoušky.

Z oceli P92 byl vykován z obdobného ingotu při teplotách 1200–950 °C výkovek hřídele, přičemž prokování bylo $P_k = 11,6$ až 24,2. Poté byl výkovek řízeně ochlazen a následovalo tepelné zpracování 1065 °C/polymerová lázeň + 750 °C/vzduch. Opět byly vykonány defektoskopické zkoušky a po jejich vyhovujících výsledcích byly odebrány vzorky pro zkoušky mechanických a creepových vlastností. Podrobnější popis přípravy experimentů je ve zprávách [2], [3].

Vliv tváření na vlastnosti ocele P91

Krátkodobé vlastnosti oceli P91 (X10CrMoVNb91) R_m , $R_{p0,2}$ a A_5 byly studovány při pokojové teplotě na šesti variantách materiálu, prokovaného stupněm prokování $P_k = 3$; 5,25. Z každého stupně byly odebrány vzorky z povrchu, jedné čtvrtiny od povrchu a poloviny průřezu.

Vlastnosti byly zjišťovány na vzorcích odebraných v podélném i příčném směru. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v tab. 3. Kromě toho byly určovány vrubové houževnatosti při pokojové teplotě a krátkodobé vlastnosti při teplotě 350 °C. Tyto vlastnosti měly obdobný charakter a je možno je nalézt v [2]. Ze zjištěných hodnot však lze konstatovat, že nebyla zjištěna žádná závislost krátkodobých vlastností na místu odběru vzorků.

Pro zjištění vlivu tváření na creepové vlastnosti byly provedeny zkoušky na vzorcích se stupněm prokování 3, 5,25 a 13. Stejně jako u krátkodobých vlastností byl zkoušen materiál, který byl odebrán z příčného i podélného směru. Zkoušky byly provedeny při teplotách 550 °C, 600 °C a 650 °C a vyhodnoceny Seifertovým modelem s Larson–Millerovým parametrem LMP [4].

Závislost napětí na LMP je zobrazena na obr. 1 pro podélně orientované vzorky. Na obr. 2 jsou ukázány výsledky příčně orientovaných vzorků. Z obrázků je zřejmé, že zatímco u prokování $P_k = 3$ a $P_k = 5,25$ nedochází k ovlivnění mechanických vlastností, u prokování $P_k = 13$ dochází při vyšších parametrech zkoušení ke zlepšení creepových vlastností materiálu.

Vliv tváření na vlastnosti ocele P92

Krátkodobé mechanické vlastnosti ocele P92 (X10CrWMoVNb92) byly zjišťovány na vzorcích, odebraných z jedné čtvrtiny a poloviny průřezu výkovku, a to v podélném i příčném směru. Pro jednotlivé stupně prokování (11,6, 15,7 a 24,2) byly zkoušeny, stejně jako v případě ocele P91, tyto vlastnosti: R_m , $R_{p,2}$, A_5 , Z při pokojové teplotě a při 350 °C a dále vrubová houževnatost. Dále uvádíme jen výsledky základních mechanických vlastností a vrubové houževnatosti při pokojové teplotě v tab. 4. Při pohledu na výsledky uvedené v tab. 4 můžeme konstatovat, že míra prokování nemá vliv na krátkodobé mechanické vlastnosti oceli P92. Tento poznatek je obdobný jako v případě ocele P91.

Na materiálu byl dále studován vliv prokování na žárupevné vlastnosti při teplotách 600 °C, 625 °C a 650 °C. Výsledky creepových zkoušek byly vyhodnoceny Seifertovým modelem [4] stejně jako výsledky ocele P91. Na obr. 3 jsou srovnány výsledky creepových zkoušek, dosažené na vzorcích odebraných v podélném směru. Na obr. 4 jsou zobrazeny výsledky vzorků, získané na příčném směru. Z grafů není patrný žádný vliv stupně prokování na žárupevné vlastnosti ocele P92.

Závěr

Vliv tváření na vlastnosti ocelí P91 a P92 byl sledován pro stupně prokování $P_k = 3$ až 13 (ocel P91) a v druhém případě pro $P_k = 11,6$ až 24,2 (ocel P92). Z výsledků zkoušek krátkodobých mechanických vlastností není patrný vliv stupně prokování na R_m , $R_{p0,2}$ a A_5 . Creepové zkoušky materiálu P92 ukazují, že průběh středních hodnot je stejný pro všechny tři stupně prokování (obr. 5). V případě oceli P91 je průběh středních hodnot rovněž téměř stejný, pouze při vyšších parametrech zkoušek se ukazují vyšší žárupevné vlastnosti pro $P_k = 13$ (obr. 6).

Literatura

- [1] ASTM (2011): A335/A335M – 11: *Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service.*
- [2] Vlasák, T., Sochor, J. (2010): *Aplikovaný výzkum a optimalizace výroby a svařování (9-12)% Cr modifikované ocele v podmínkách průmyslu ČR.* Dílčí technická zpráva, FR-TI1/257/2010-2, SVÚM a.s.
- [3] Neumanová, Š., Vlasák, T.: *Studium vlivu stupně prokování na vlastnosti ocele X10CrWMoVNb92.* Průběžná zpráva, TG03010032-31-1/4, SVÚM a.s.

- [4] Seifert, W., Melzer, B. (1992): *Rechnerische Auswertung von Zeitstandversuchen am Beispiel des Stahles 13CrMo4-4.15*. Vortragveranstaltung „Langezeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, Düsseldorf.
- [5] European Creep Collaborative Committee (2005): *ECCC Data Sheets*. ETD Ltd.

Tab. 1: Chemické složení oceli P91 [hm. %] [1]

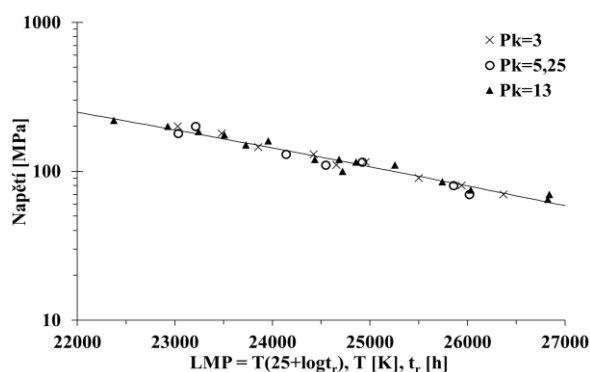
Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Al	N
min	0,08	0,30	0,20			8,00		0,85	0,18	0,06		0,03
max	0,12	0,60	0,50	0,02	0,01	9,50	0,40	1,05	0,25	0,1	0,04	0,07
40529	0,09	0,50	0,43	0,017	0,003	8,15	0,31	0,89	0,21	0,08	0,007	0,038

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

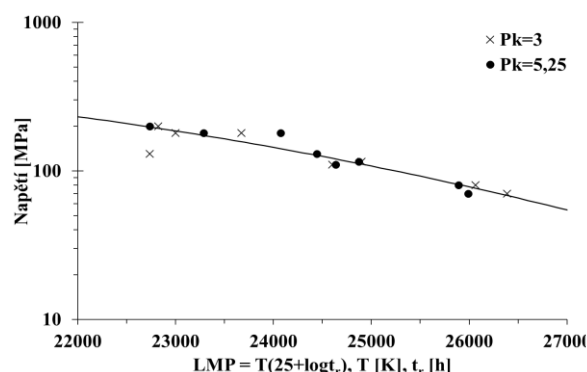
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb	Al	N
min	0,07	0,3				8,5		0,3	0,15	1,5	0,04		0,03
max	0,13	0,6	0,5	0,02	0,01	9,5	0,4	0,6	0,25	2	0,09	0,04	0,07
57448	0,1	0,47	0,22	0,017	0,002	8,9	0,4	0,58	0,2	1,71	0,068	0,005	0,0476

Tab. 3: Mechanické vlastnosti ocele P91 [1]

Odběr vzorků		P _k =3				P _k =5,25			
		R _m [MPa] min.585	R _{p0,2} [MPa] min.415	A ₅ [%] min.19	Z [%]	R _m [MPa] min.585	R _{p0,2} [MPa] min.415	A ₅ [%] min.19	Z [%]
z povrchu	podélné	652	497	24,2	73,0	652	488	24,0	73,0
	příčné	651	494	22,6	69,8	653	484	22,8	70,8
1/4 od povrchu	podélné	657	490	23,2	70,8	639	486	24,2	74,0
	příčné	657	497	23,0	68,6	643	484	24,0	69,8
1/2 od povrchu	podélné	654	497	23,0	70,8	637	477	23,8	74,0
	příčné	661	497	26,8	67,5	637	471	23,2	66,4



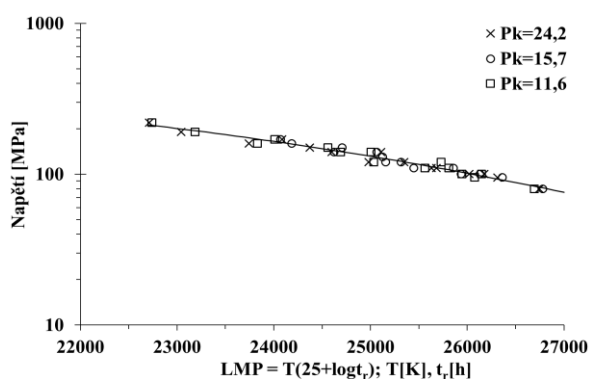
Obr. 12: Žárupevné vlastnosti ocele P91; P_k=3, P_k=5,25 a P_k=13; podélně orientované vzorky



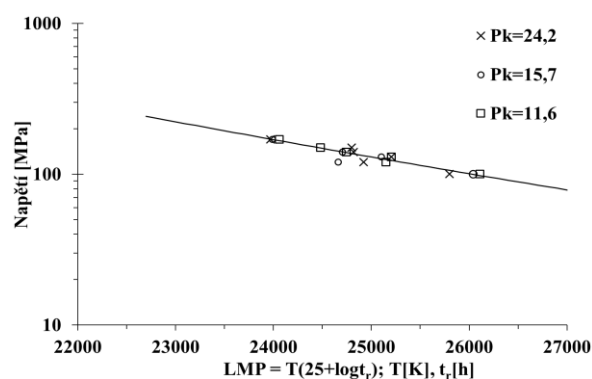
Obr. 13: Žárupevné vlastnosti ocele P91; P_k=3, P_k=5,25; příčně orientované vzorky

Tab. 4: Mechanické vlastnosti ocele P92 [1]

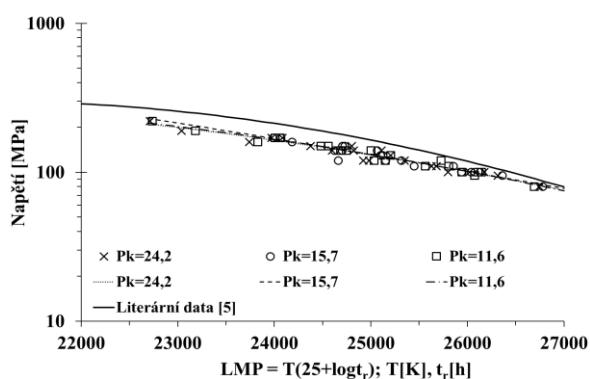
P _k	Místo odběru	R _{p0,2} /R _m 20°C				KV [J]		
		R _{p0,2} [MPa] min. 440	R _m [MPa] min. 620	A ₅ [%] min.19	Z [%]	příčná min. 41, podélná min. 68		
						1	2	3
11,6	1/2 Re podélná	478	640	23,3	66,40	136	134	135
	1/2 Re příčná	500	668	18,2	46,70	65	69	61
	1/4 Re podélná	495	665	22,0	64,00	137	131	134
	1/4 Re příčná	495	667	21,0	57,80	73	60	62
15,7	1/2 Re podélná	493	662	23,3	61,65	130	163	145
	1/2 Re příčná	507	675	19,9	31,10	68	60	52
	1/4 Re podélná	500	667	21,9	60,95	143	158	161
	1/4 Re příčná	513	682	19,9	59,95	57	86	73
24,2	1/2 Re podélná	490	649	25,0	66,40	167	177	175
	1/2 Re příčná	498	662	21,2	56,40	63	66	86
	1/4 Re podélná	503	674	23,4	67,50	171	174	190
	1/4 Re příčná	502	666	21,3	59,00	58	79	78



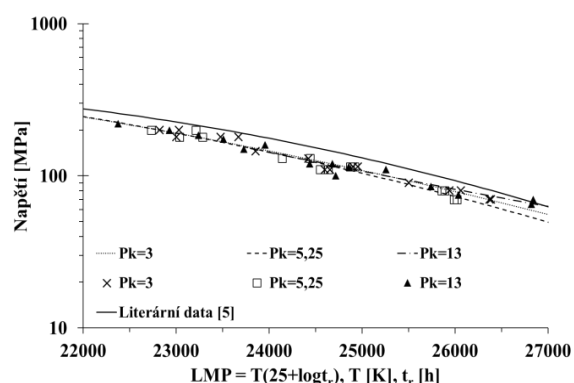
Obr. 3: Creepové vlastnosti ocele P92 v podélném směru



Obr. 4: Creepové vlastnosti ocele P92 v příčném směru



Obr. 5: Vliv stupně prokování na creepové vlastnosti oceli P92



Obr. 6: Vliv stupně prokování na creepové vlastnosti oceli P91

HOMOGENITA STRUKTURY A VLASTNOSTÍ TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ Z OCELI P92

HOMOGENEITY OF THE STRUCTURE AND CPROPERTIES OF THICK-WALLED PRODUCTS MADE OF P92 STEEL

Zdeněk Kuboň a Ladislav Kander

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Ostrava

Abstrakt

Článek se zabývá strukturou a vlastnostmi trubky s tloušťkou stěny 90 mm vyrobené z oceli P92. Metalografická analýza odhalila četné řediny zejména u vnitřního povrchu trubky, které jsou zřejmě důsledkem nedostatečného protváření při válcování trubky. Srovnání lokálních materiálových vlastností u obou povrchů trubky bylo provedeno jednak pomocí metalografie, jednak tahovými zkouškami, zkouškami tvrdosti, zkouškami vrubové houževnatosti a penetračními zkouškami malých vzorků. Získané výsledky jsou porovnány s materiálovými požadavky na ocel P92 a doplněny úvahami o vlivu nehomogenity struktury a vlastností na dlouhodobou životnost trubky v podmínkách creepového namáhání.

Abstract

The paper deals with the microstructure and properties of a pipe with a wall thickness of 90 mm made of P92 steel. Metallographic analysis revealed numerous dilutions, especially close to the inner surface of the pipe, which developed probably due to insufficient deformation during pipe rolling. The local material properties of both pipe surfaces were compared by metallography, tensile tests, hardness tests, Charpy-V notch toughness tests as well as penetration tests of small samples. The obtained results are compared with the material requirements for P92 steel and an attempt is made to evaluate the possible influence of the inhomogeneity of the microstructure and properties on the long-term service life of the pipe under creep conditions.

Úvod

V polovině roku 2018 bylo v rámci programu THÉTA zahájeno řešení projektu TK01020160 „Komplexní postupy materiálového inženýrství k zajištění bezpečného provozu inovovaných bloků klasických elektráren“, kterého se účastní mimo MMV také ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o., a UJP Praha, a.s. Jedním z hlavních cílů tohoto projektu je materiálový výzkum zaměřený na získání databáze vlastností nově nasazovaných či retrofitovaných materiálů se zvláštním zaměřením na creepové, únavové a křehkolomové vlastnosti ohybů kotlových trubek i parovodů, svarových spojů a dalších kritických komponent energetických kotlů. Znalost těchto materiálových dat spolu s odpovídajícím postupem jejich vyhodnocení umožní provozovatelům energetických zařízení lépe řídit spolehlivost a čerpání životnosti systémových zdrojů.

Jedním z těchto materiálů používaných zejména na parovody USC kotlů je i ocel P92 (X10CrWMoVNb 9-2). Je to jedna z komerčně nejúspěšnějších martenzitických žárupevných ocelí, která mezi nimi dosahuje zároveň i nejvyšší dlouhodobě ověřenou žárupevnost [1]. Avšak pro náročné pracovní parametry parovodů USC kotlů to znamená, že tloušťka stěny parovodní trubky se i u této oceli může blížit 100 mm. S ohledem na rozměry použitého výchozího polotovaru a stupeň jeho protváření tak může výsledné materiálové charakteristiky tlustostěnné trubky významně ovlivnit i nehomogenita struktury. Martenzitické žárupevné oceli jsou samostatné, což znamená, že rychlost ochlazování a volba ochlazovacího média nemá na vznik martenzitu a jeho výsledné vlastnosti až tak významný vliv. Na druhou stranu, v případě nedokonalé protvářené struktury se v ní mohou vyskytovat zbytky původní dendritické struktury včetně ředin, což může mít negativní vliv na užité vlastnosti oceli.

Experimentální materiál a provedené analýzy

V rámci řešení projektu TK01020160 dochází ke komplexnímu ověřování materiálových charakteristik parovodní trubky z oceli P92. Jedná se o trubku nominálních rozměrů ID = 350 mm s nominální tloušťkou stěny 80 mm, která byla dodána ve stavu po provozním tepelném zpracování. Její chemické složení včetně požadavku uvedeného v ČSN EN 10216-2 [2] je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: Chemické složení trubky z oceli P92

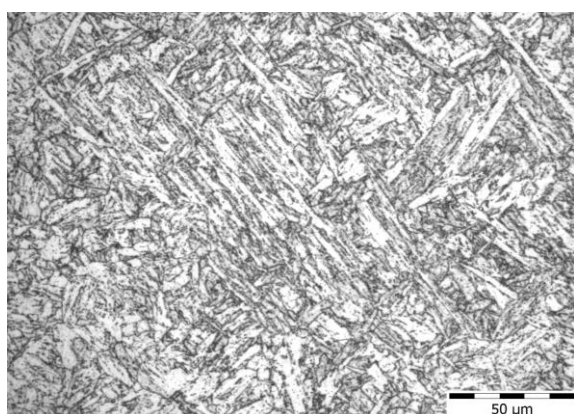
Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Mo	V	Nb	N	Al	B
Trubka	0,10	0,41	0,20	0,013	0,004	8,74	1,66	0,48	0,18	0,050	0,056	0,001	0,0020
ČSN EN	0,07- 0,13	0,30- 0,60	≤0,50	max. 0,020	max. 0,010	8,5- 9,5	1,5- 2,0	0,3- 0,6	0,15- 0,25	0,04- 0,09	0,003- 0,007	≤0,020	0,001- 0,006

Komplexní analýza materiálových vlastností této trubky zahrnovala ověření mechanické pevnosti za laboratorní i zvýšené teploty, provádění zkoušek vrubové houževnatosti a sestavení křivky přechodu křehký-houževnatý stav, proměření profilu tvrdosti přes tloušťku stěny, analýzu mikrostruktury a také provádění creepových zkoušek.

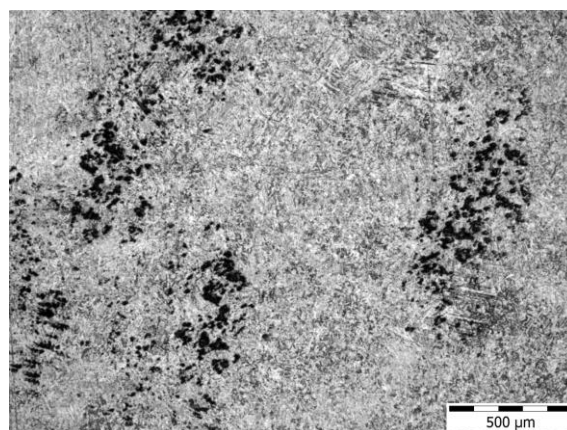
Mikrostruktura a mechanické vlastnosti

Metalografická analýza potvrdila popuštěnou martenzitickou strukturu trubky (obr. 1), odhalila však, že se prakticky v celém průřezu stěny trubky nacházejí shluky ředin. Jejich výskyt byl četnější u vnitřního povrchu trubky a, jak je vidět na obr. 2 a obr. 3, velikost těchto shluků se pohybovala v malých jednotkách milimetrů. Potvrzení skutečnosti, že se jedná skutečně o řediny přineslo zobrazení v topografickém kontrastu při pozorování na skenovacím elektronovém mikroskopu v režimu odražených elektronů, při kterém jsou uvnitř jednotlivých ředin velmi zřetelně patrné zaoblené útvary původních dendritů, obr. 4.

Výsledků metalografické analýzy bylo rozhodnuto rozšířit porovnávací zkoušky mechanických vlastností o tahovou zkoušku na zkušebních tělesech umístěných těsně pod vnějším a těsně pod vnitřním povrchem prováděnou při laboratorní teplotě a při teplotě 600 °C. Výsledky jsou shrnuty v tab. 2 spolu se srovnáním s požadavky, uvedenými v ČSN EN 10216-2.



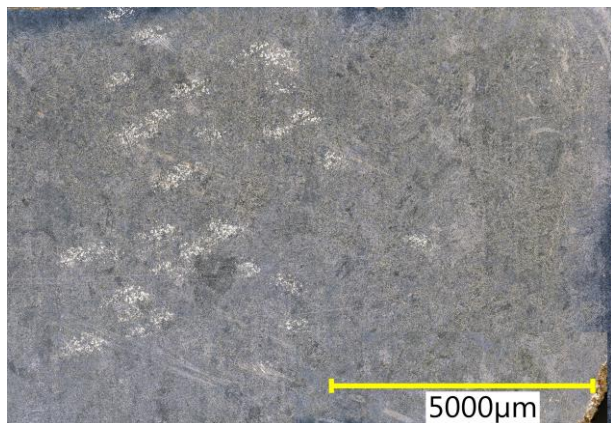
Obr. 1: Mikrostruktura trubky z oceli P92



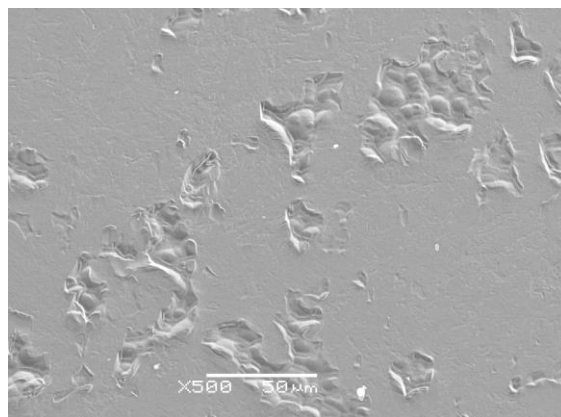
Obr. 2: Řediny u vnitřního povrchu trubky

Jak je zřejmé z výsledků uvedených v tab. 2, pohybuje se rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi u obou povrchů trubky při laboratorní teplotě pouze v jednotkách megapascalů a ani při teplotě 600 °C nepřesáhne 5 %. Lze tedy říci, že mezi oběma povrchy neexistuje v mechanických vlastnostech prakticky žádný rozdíl. Při srovnání s požadavkem na mechanické vlastnosti oceli P92 se ukazuje, že daná trubka patří do skupiny trubek s relativně nízkou pevnostní úrovní,

kdy se hlavně meze pevnosti nacházejí velmi blízko spodní hranice požadavku na minimální pevnost v tahu.



Obr. 3: Shluk ředin

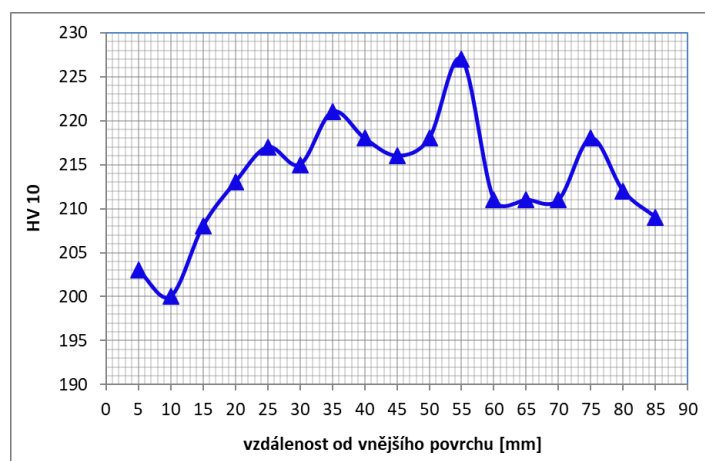


Obr. 4: Řediny, SEM, režim TOPO

Tab. 2: Mechanické vlastnosti u vnějšího a vnitřního povrchu trubky

Teplota	+20 °C				600 °C			
	R _{p0.2}	R _m	A ₅	Z	R _{p0.2}	R _m	A ₅	Z
	[MPa]		[%]		[MPa]		[%]	
Vnitřní	481	651	27,4	69,6	280	294	22,1	89,5
Vnější	484	645	26,6	72,2	292	306	21,9	89,5
ČSN EN 10216-2	≥440	620-850	≥17,0	-	≥248	-	-	-

Podobně se ani tvrdost významněji nemění směrem od vnějšího k vnitřnímu povrchu, jak je patrné z obr. 5. Tvrdost je minimální blízko vnějšího povrchu trubky, v celé tloušťce stěny se mění pouze o necelých 30 HV a maxima dosahuje v hloubce asi 55 mm pod vnějším povrchem, odkud směrem k vnitřnímu povrchu opět klesá.

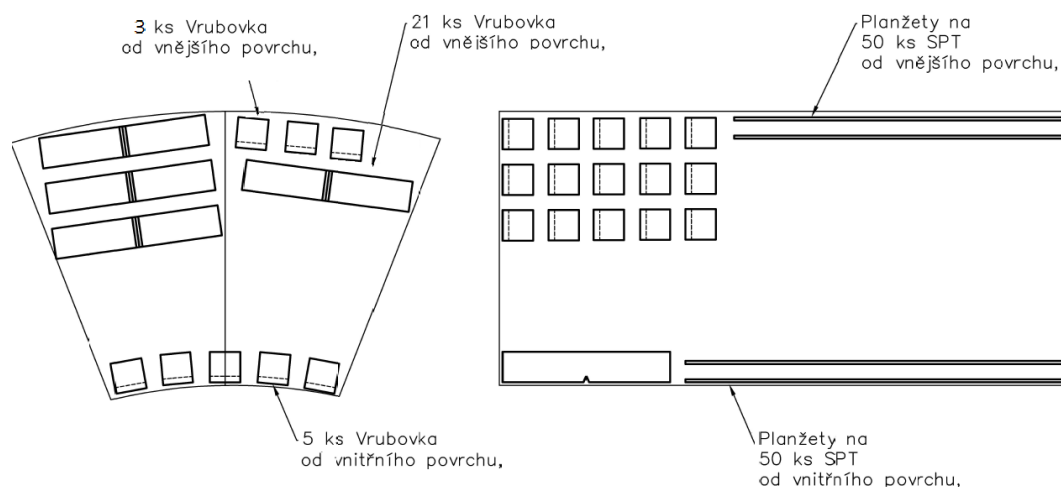


Obr. 5: Profil tvrdosti HV 10 přes tloušťku stěny trubky

Vrubová houževnatost

Zkoušky rázem v ohybu byly původně prováděny na zkušebních tělesech Charpy s V-vrubem v příčném směru, přičemž zkušební tělesa pro stanovení celé Vidalovy křivky přechodu křehký-houževnatý stav byla připravena z oblasti pod vnějším povrchem. Po zjištění defektů ve struktuře byla pro srovnání vlastností u obou povrchů vyrobena i další zkušební tělesa, jejichž orientace v podélném směru byla zvolena s ohledem na výsledky metalografické analýzy,

kdy rovina šíření trhliny odpovídá předpokládanému směru růstu defektu přes tloušťku stěny trubky (obr. 6).

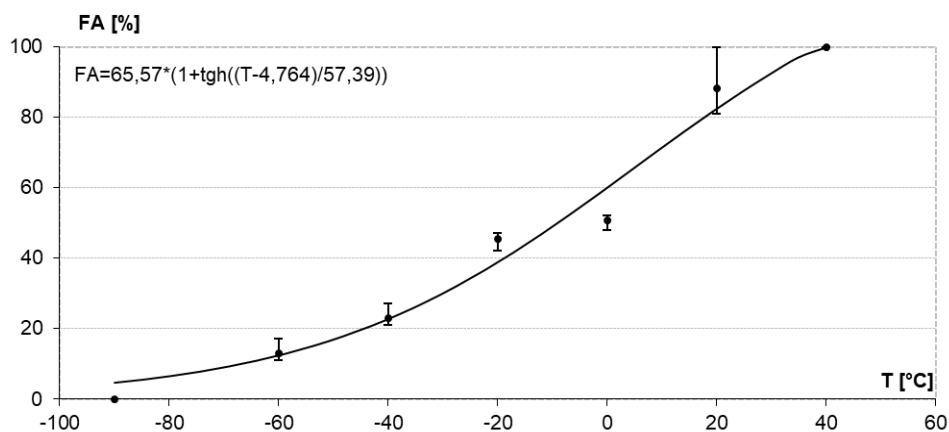


Obr. 6: Lokalizace zkušebních těles pro zkoušky vrubové houževnatosti

Výsledky zkoušek rázem v ohybu jednak ukázaly vysoké hodnoty nárazové práce trubky při laboratorní teplotě, jednak nepotvrdily rozdíl ve velikosti nárazové práce mezi vnějším a vnitřním povrchem, tabulka 3. Výsledná Vidalova křivka je ukázána na obr. 7 a odpovídající výše přechodové teploty křehký-houževnatý stav (FATT) uvedena v tab. 3.

Tab. 3: Nárazové práce při laboratorní teplotě a teplota FATT

Povrch trubky	Nárazová práce KV při +20 °C	FATT
	[J]	[°C]
Vnitřní	169, 166, 169	-9
Vnější	160, 166, 197	



Obr. 7: Vidalova křivka závislosti podílu houževnatého lomu na teplotě

Creepová odolnost

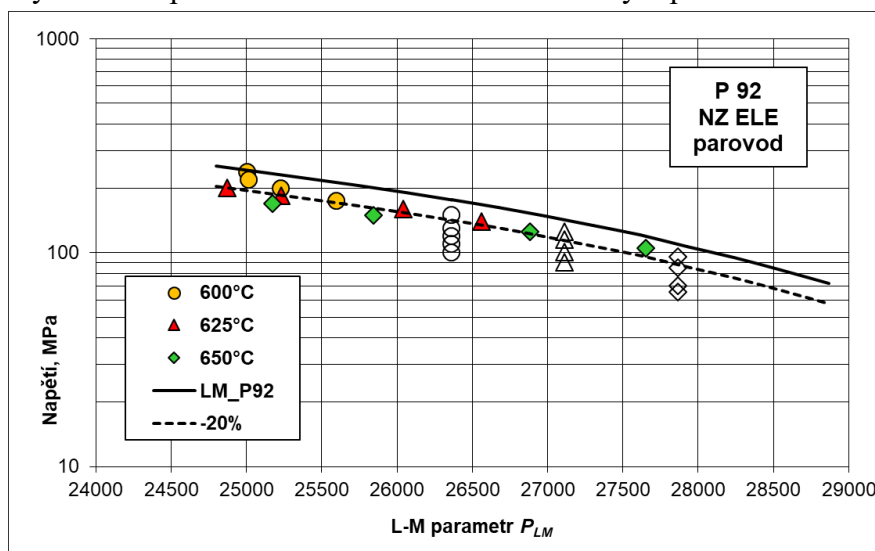
Svojí velikostí v řádu malých desítek mikrometrů odpovídají pozorované defekty propojeným kavitám až řetízkům kavit. Je proto velice zajímavé zjistit, zda, kdy a jak se přítomnost těchto apriorních strukturních vad projeví na creepové odolnosti trubky. Původní creepový program byl primárně zaměřen na ověření shody creepové odolnosti trubky s požadavkem udaným v materiálové normě a zkušební tělesa pro creepové zkoušky byla vyrobena z celého průřezu trubky a zkoušena při teplotách 600, 625 a 650 °C; pro posouzení creepových vlastností v blíz-

kosti obou povrchů byl proto tento program rozšířen o creepové zkoušky malých vzorků (SPCT) připravených z oblastí jak od vnějšího, tak i od vnitřního povrchu (viz planžety na obr. 6), které byly zkoušené při teplotě 650 °C. Jelikož doby do lomu dosud ukončených creepových zkoušek jsou zatím jen velice krátké, byla pro grafické srovnání výsledků a jejich interpretaci použita metoda přepočtu experimentálních dat do Larson-Millerovy parametrické rovnice ve tvaru [3]

$$P = T \cdot (C + \log t), \quad (1)$$

kde T znamená teplotu v Kelvinech, t je doba do lomu v hodinách. Larson-Millerova konstanta C ($C = 26,8$) byla při tomto zpracování získána pomocí metody nejmenších čtverců přepočtem z výsledků uváděných pro ocel P92 ve standardu ČSN EN 10 216-2.

Závislost střední hodnoty meze pevnosti při tečení oceli P92 na tomto obrázku představuje plná čára, zatímco čárkovaná čára reprezentuje povolenou -20% odchylku od této střední hodnoty. Uvedené srovnání ukazuje, že reálné výsledky creepových zkoušek této parovodní trubky se nacházejí sice pod střední hodnotou, ale prakticky všechny ve spodním povoleném rozptylovém 20% pásmu okolo ní (čárkovaná čára), přičemž trendově se žárupevnost trubky s rostoucí teplotou a prodlužující se dobou do lomu přibližuje ke střední standardizované hodnotě. Prázdné symboly uvedené na obr. 8 představují lomem dosud neukončené zkoušky, a i ty naznačují vcelku dobrá východiska pro dlouhodobé nasazení této trubky v podmínkách 660 MW kotle.



Obr. 8 Závislost napětí na Larson-Millerově parametru P_{LM}

Podobně jako u ostatních materiálových charakteristik, byl i pro srovnání creepových vlastností u obou povrchů trubek připraven program creepových zkoušek malých vzorků (SPC testy), jehož první výsledky budou uvedeny v prezentaci tohoto příspěvku na konferenci.

Diskuze výsledků

Přítomnost shluků ředin v tvářené tlustostěnné trubce rozhodně není obvyklá a v daném případě s největší pravděpodobností souvisí s nízkým stupněm protváření oceli při výrobě takto tlustostěnné trubky, ať už je výchozím polotovarem ingot nebo kontislitek. Výskyt ředin je obvyklý a akceptovatelný v případě odlitků, avšak ani u nich není obvyklé, aby se vyskytovaly v takto četných shlucích, ale jsou spíše náhodně rozloženy ve struktuře, což eliminuje jejich negativní vliv na užité vlastnosti oceli. Ve sledovaném případě nejenže byly četné řediny ve

stěně trubky zjištěny, ale lokálně bylo jejich nahromadění značné a rozměrově se tyto skupiny defektů již dostaly na úroveň mikrotrhlin.

Analýza mechanických, křehkolomových i krátkodobých creepových vlastností tlustostěnné trubky pak dosud neprokázala žádný vliv existence shluků ředin ve struktuře na některou z materiálových charakteristik. Zda vůbec a do jaké míry řediny představují reálné nebezpečí zejména pro pokles žárupevnosti trubky není prozatím možné určit, protože výsledky dosud ukončených creepových zkoušek dosahují pouze časů v řádu tisíce hodin, kdy hraje nejvýznamnější roli odpevnění struktury charakterizované v takto krátkých časech zejména poklesem hustoty dislokací a v menší míře nahrubnutím precipitátů. U krátkodobých creepových zkoušek rovněž převládají lomy transkrystalické, kdežto v případě dlouhých časů se charakter lomů mění na interkrystalický a creepové poškození se v celém objemu mění na kavitační a soustředí se na hranice zrn. Podobně i rostoucí creepová trhlinka zřejmě po dosažení takto poškozené oblasti skokově změni svoji délku o několik milimetrů a rychleji se tak přiblíží kritické velikosti pro vznik náhlého nestabilního lomu. Ve zrelaxované a odpevněné struktuře tak může podobný defekt významně urychlit čerpání životnosti a snížit míru bezpečnosti provozování daného uzlu.

Závěr

Zjištěné shluky ředin ve struktuře tlustostěnné trubky z oceli P92 mohou do budoucna představovat potenciálně závažné riziko pro bezpečnost i spolehlivost provozu kotle. Parovodu by proto měla být do budoucna věnována zvýšená diagnostická pozornost, zejména pak v období blízkého konce projektované životnosti. V současnosti pak v rámci řešení zmíněného projektu probíhají i další práce zaměřené na stanovení lomové houževnatosti a podmínek růstu trhlin při dynamickém namáhání.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu THĚTA TK01020160 „Komplexní postupy materiálového inženýrství k zajištění bezpečného provozu inovovaných bloků klasických elektráren“.

Literatura

- [1] Kimura, K., Toda, Y., Kushima, H., Sawada, K. (2010): *Creep strength of high chromium steel with ferrite matrix*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 87, pp. 282-288. ISSN 0308-0161
- [2] ČNI (2008): *ČSN EN 10216-2+A2: Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení – Technické dodací podmínky – Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. Český normalizační institut, Praha.
- [3] Monkman, F. C., Grant, N. J. (1956): *An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests*. Proceedings-American Society for Testing and Materials, Vol. 56, pp. 593-620.

KOROZNĚ ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI OCELI 13%CR4%NI PRO KOMPONENTY VODNÍCH TURBÍN

CORROSION-FATIGUE PROPERTIES OF 13%CR4%NI STEEL FOR HYDROTURBINE COMPONENTS

Josef Strejcius, Zbyněk Špirit a Zdeněk Fulín

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Příspěvek se zabývá korozní únavou oceli 13%Cr4% Ni vyrobené VOD procesem. Byly provedeny únavové testy na hladkých zkušebních tyčích při frekvenci zatěžování cca 123 Hz, při asymetrii kmitu $R=-1$, ve vodě s přidavkem NaCl 500 mg/l, při definované teplotě 15 °C, při rovnovážném obsahu rozpuštěného kyslíku, kontrolovaném pH, s měřením elektrodového potenciálu a elektrochemického šumu. Pro srovnání byla stanovena Wöhlerova křivka na vzorcích stejné geometrie při zatěžování 76 Hz na vzduchu při 20 °C. S-N křivky budou použity v diagnostice umožňující vyhodnocovat vliv povrchových vad a změny tvaru geometrie oběžných kol vodních turbín na riziko únavového poškození vyvíjené v rámci podprogramu NCK DP2S1 PB1.18 „Diagnostika oběžných kol vodních turbín a posouzení přípustnosti zjištěných indikací“.

Abstract

The paper deals with the corrosion fatigue of the VOD manufactured 13%Cr4%Ni steel. Several corrosion fatigue tests were performed on round specimens in water solution of 500 mg/l NaCl and equilibrium oxygen content at temperature 15 °C. Tests were performed at load frequency 123 Hz and stress ratio $R=-1$. Corrosion potential and electrochemical noise were recorded during the test. For further comparison, Wohler curve was measured on similar specimens on air at 90 Hz and 20 °C. S-N curves will be used for diagnostic of water turbine runners, especially to determine the influence of surface defects on fatigue life. The work is part of the project NCK DP2S1 PB1.18 “The diagnostic of water turbine runners and evaluating the admissibility of detected indications”.

Úvod

Vodní elektrárny jsou důležitým zdrojem elektrické energie. V roce 2009 byl celosvětový instalovaný výkon vodních elektráren 926-980 GW, v roce 2011 se dodávky elektriny z vodních elektráren podílely 17 % na celosvětové spotřebě elektrické energie [1]. Nároky na vodní turbíny v současnosti rostou. Rozvoj dalších obnovitelných zdrojů závislých na počasí – především fotovoltaiky a větrných elektráren – znamená velké zatížení pro přenosové a distribuční sítě a „voda“ – zvláště v přečerpávacích elektrárnách stále více přebírá roli akumulárního prvku celé přenosové soustavy. Od vodních turbín se očekává, že svůj výkon dokáží flexibilně přizpůsobovat momentálním požadavkům sítě a to ideálně v celém spektru, od nuly až po maximální výkon. Rychlé a časté změny provozních režimů turbín, spojené s vibracemi, mají za následek iniciaci a šíření korozně únavových trhlin a v konečném důsledku závažné havárie turbín [2].

Centrum výzkumu Řež s.r.o. v rámci dílčího projektu TN01000007 Národní centrum pro energetiku řeší úkol, jehož cílem je získání diagnostického postupu, který umožní monitorovat a vyhodnocovat vliv povrchových vad a změny tvaru geometrie oběžných kol vodních turbín na riziko únavového poškození, predikovat čas poruchy a povede ke zvýšení disponibility a spolehlivosti provozu vodních turbín. Hlavním řešitelem projektu je Vysoké učení technické v Brně a průmyslovým partnerem ČEZ, a. s. Centrum výzkumu Řež s.r.o. je v projektu zodpo-

vědné za ověření základních materiálových, křehkolomových a únavových vlastností oceli 13%Cr 4%Ni v litém stavu, vyrobené VOD procesem. V průběhu let 2019–20 budou provedeny materiálové analýzy:

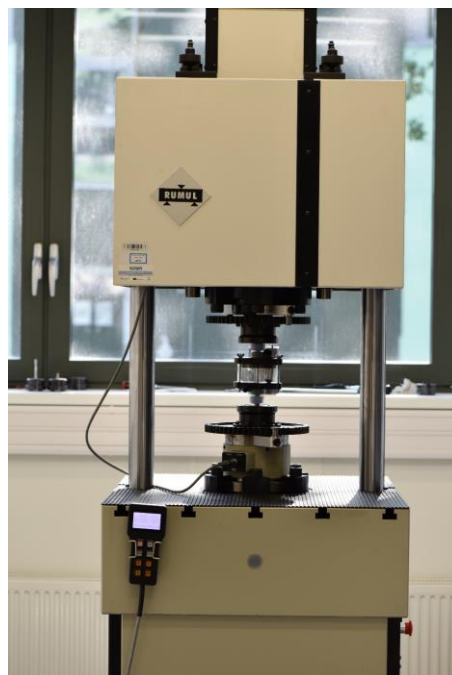
- ověření základních pevnostních vlastností experimentálního materiálu, stanovení meze únavy na vzduchu na hladkých a vrubovaných válcových tyčích při asymetrii kmitu $R = 0, -1$ a při středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa, určení dynamická lomové houževnatosti a stanovení přechodové křivky;
- metalografická analýza experimentálního materiálu a ověření chemického složení;
- zkoušky korozní vysokocyklové únavy: stanovení S-N křivek na hladkých a vrubovaných válcových tyčích při asymetriích kmitu $R = 0, -1$ a středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa, v proudící vodě s obsahem chloridu sodného 500 mg/l, při definované teplotě v intervalu 15 ± 1 °C, při rovnovážném obsahu rozpuštěného kyslíku, kontrolovaném pH, s měřením elektrochemického elektrodového potenciálu a proudového šumu;
- zkoušky rychlosti šíření únavových trhlin v proudící vodě s obsahem chloridu sodného 500 mg/l, při definované teplotě v intervalu $15\text{--}20$ °C, při rovnovážném obsahu rozpuštěného kyslíku, kontrolovaném pH, s měřením elektrodového potenciálu při asymetrii kmitu $R = 0$ a při středním předpětí $\sigma_m = 330$ MPa;
- fraktografická analýza lomových ploch.

Experimentální práce na projektu byly zahájeny v 2. čtvrtletí roku 2019, příspěvek shrnuje dosažené výsledky k 31. 8. 2019.

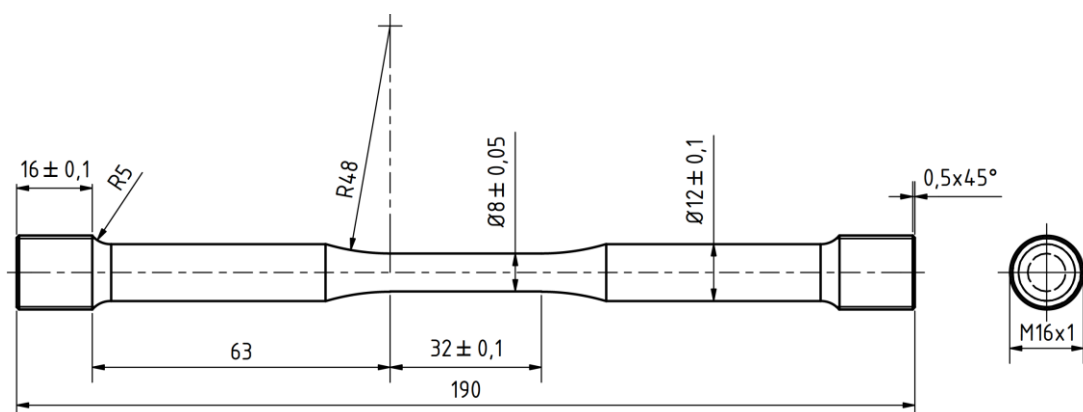
Metodika zkoušek vysokocyklové korozní únavy

Zkoušky vysokocyklové únavy na hladkých a vrubovaných tělesech byly/budou prováděny na elektromagnetickém pulzátoru se silovou kapacitou ± 250 kN. Při zkouškách korozní únavy je pracovní část zkušebních těles umístěna v průtočné měřicí cele – viz obr. 1, kterou protéká voda chlazená na 15 ± 1 °C. Voda obsahuje chlorid sodný v koncentraci 500 mg/l podobně jako v práci M. Varnera [3], obsah kyslíku není regulován. Objem korozní cely je 300 ml, cela je silikonovými hadicemi propojena se zásobníkem na zkušební roztok o objemu 1 l. Zásobník je plášťovaná skleněná nádoba, chlazení je termostatem s kompresorem. Cirkulace roztoku mezi celou a zásobníkem je zajištěna membránovým čerpadlem s průtokem 1 l/min. Kromě testovaného vzorku do měřicí cely zasahují přes porty v horním víku stříbrochloridová elektroda pro měření oscilací elektrodového potenciálu zkušební vzorku a pomocná elektroda z materiálu stejného chemického složení jako má zkušební vzorek pro registraci elektrochemického proudového šumu. Signály z elektrod a zkušební vzorku jsou zaznamenávány a vyhodnocovány elektrochemickým potenciostatem v ZRA režimu.

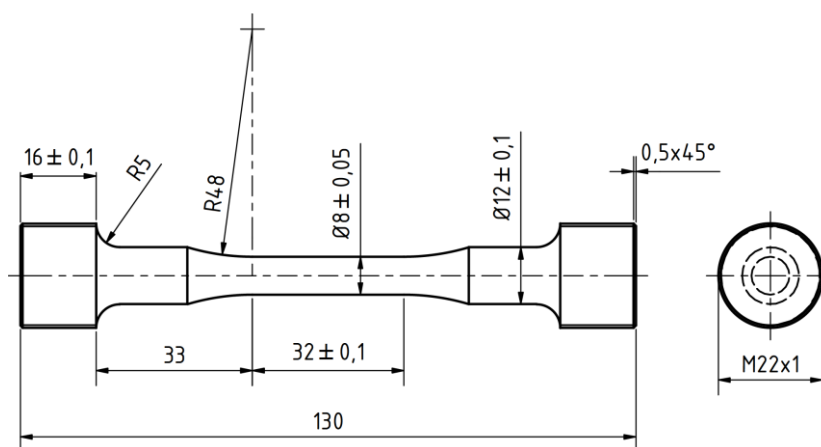
Pro únavové testy byly navrženy a vyrobeny vzorky dle obr. 2 až obr. 5. Vzorky pro zkoušky na vzduchu i ve vodě mají stejný tvar pracovní části: $\varnothing = 8$ mm, a délku = 32 mm. Vzorky používané pro měření ve vodě jsou delší – 190 mm, vzorky pro zkoušky na vzduchu jsou dlouhé 130 mm. Vrbované tyče jsou opatřeny uprostřed pracovní části obvodovým V-vrubem s hloubkou 0,5 mm. Konce zkušebních tyčí jsou zakončeny závitem M16 pro uchycení do upínačů zkušebního stroje, v případě tyčí pro zkoušku únavy na vzduchu na hladkých tyčích jsou závity M22. Zkoušky vysokocyklové únavy ve vodě jsou prováděny při frekvenci 123 Hz, zkoušky únavy na vzduchu při frekvenci 76 Hz. Nižší frekvence zatěžování při zkouškách na vzduchu při použití hladkých vzorků byla vynucena zahříváním vzorku během testu.



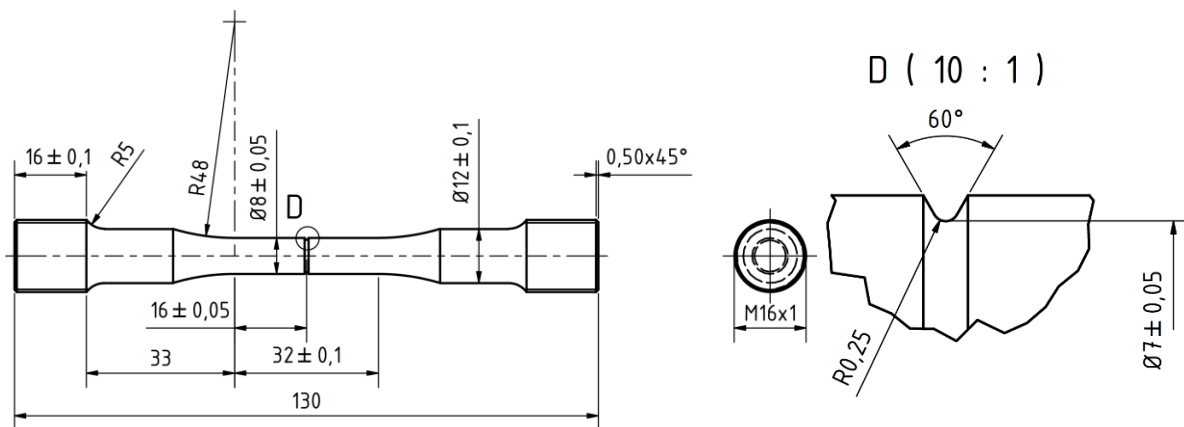
Obr. 1: Měřicí cela pro zkoušky korozní vysokocyklové únavy



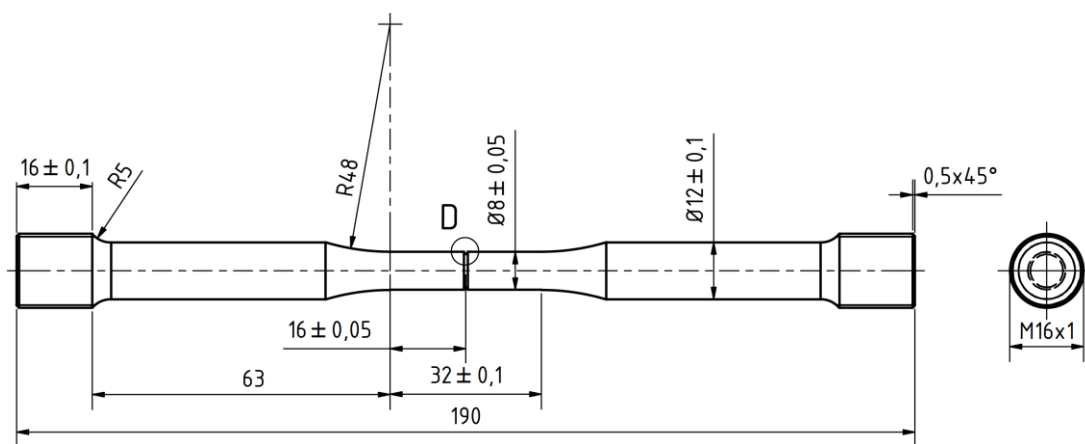
Obr. 2: Vzorek pro zkoušky korozní vysokocyklové únavy



Obr. 3: Vzorek pro zkoušky vysokocyklové únavy

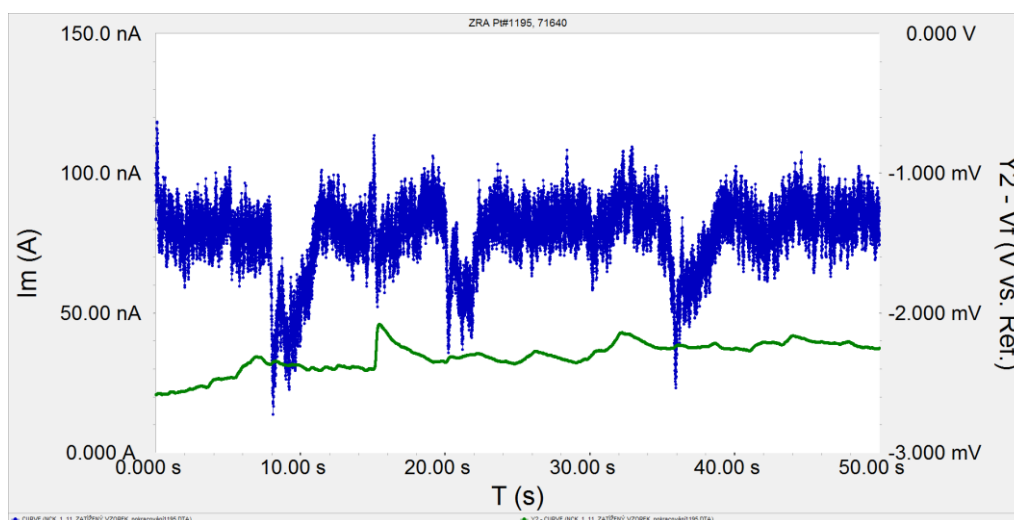


Obr. 4: Vzorek pro zkoušky vysokocyklové únavy



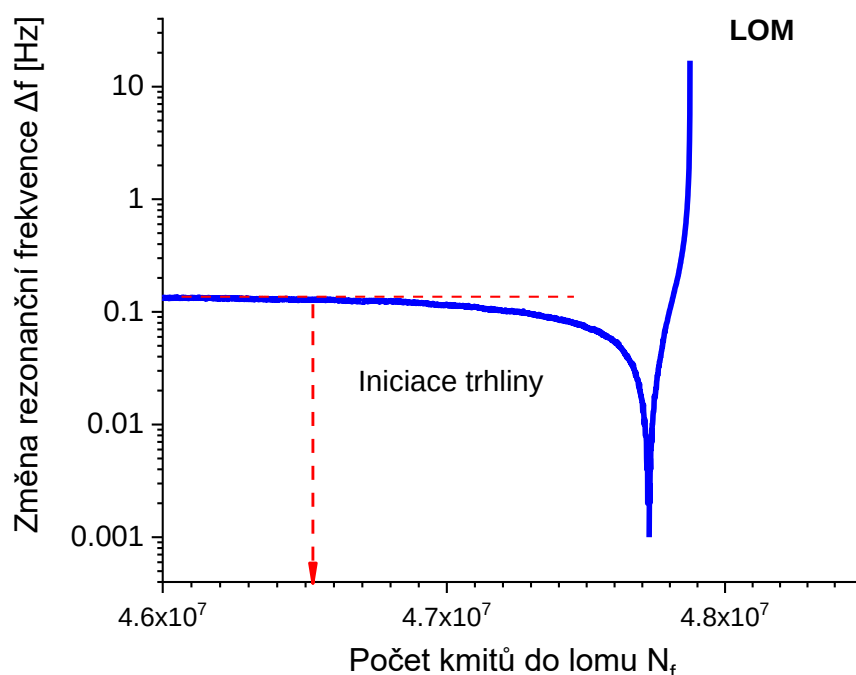
Obr. 5: Vzorek pro zkoušky korozní vysokocyklové únavy

Při korozně-únavových zkouškách je monitorován elektrochemický potenciálový a proudový šum se vzorkovací frekvencí 500 Hz měřený v blocích po 50 s, viz obr. 5.



Obr. 6: Navzorkovaný signál elektrochemického šumu

Iniciace trhlin a šíření při testech vysokocyklové únavy je odhadována ze změny rezonanční frekvence – příklad na obr. 7 a z frekvenčních spekter signálu elektrochemického šumu.



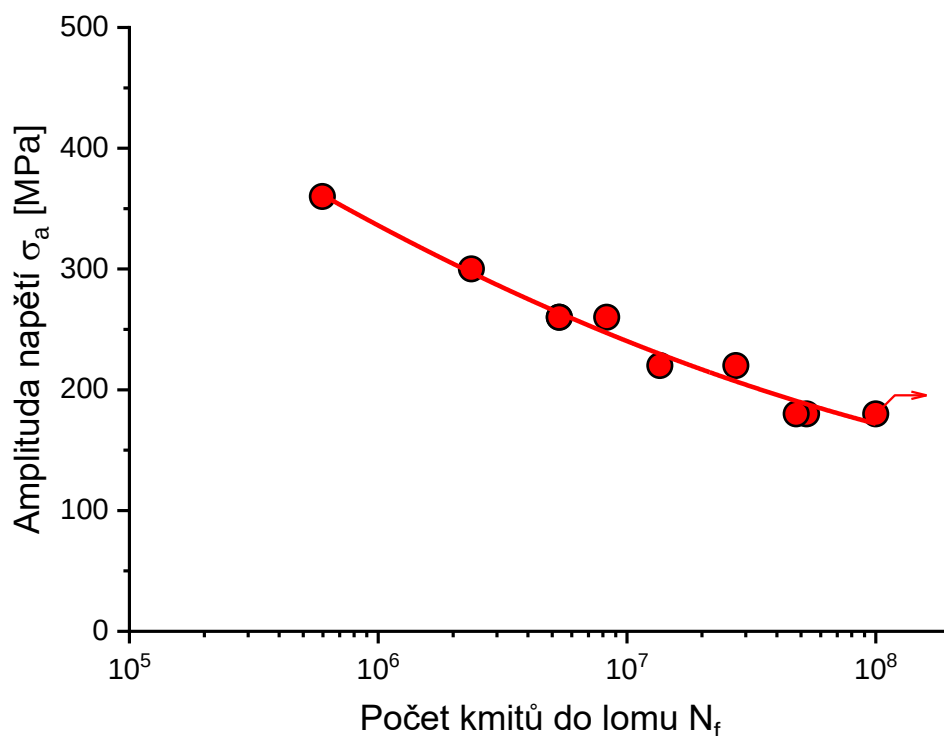
Obr. 7: Závislost absolutní hodnoty změny rezonanční frekvence na počtu cyklů do lomu (zkouška při $\sigma_a = 180$ MPa, $R = -1$, $N_f = 47\,872\,743$ cyklů)

Experimentální materiál

Experimentální materiál pro materiálové testy je martenziticko austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317EN 10027-2) v zušlechtěném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu), od výrobce Litostroj Engineering, a.s. Jako subdodávka ČEZu, a. s. byly dodány přilité zkušební bloky z výroby rozváděcích lopatek o rozměrech 100x110x250 mm a 100x110x350 mm z taveb 1860, 1722, 34812/2 a 34818/3.

Výsledky zkoušek vysokocyklové únavy

Ke dni odevzdání příspěvku k tisku byly provedeny zkoušky vysokocyklové únavy oceli GX4CrNi13-4 měřené na hladkých vzorcích ve vodě s přídavkem chloridu sodného, temperované na 15 °C, při střídavém namáhání v tahu/tlaku při frekvenci 123 Hz a zahájeno měření pro stanovení meze únavy na vzduchu. Naměřená data jsou v grafu na obr. 8. Mez únavy na vzduchu při daném způsobu namáhání je na základě předběžných výsledků odhadována na 300 MPa, časovaná únavová pevnost pro 10^8 kmitů a frekvenci zatěžování 123 Hz ve vodě 180 MPa.



Obr. 8: S-N křivka oceli GX4CrNi13-4 + QT1 při zatěžování ve vodě temperované na 15 °C a obsahující chlorid sodný v koncentraci 500 mg/l, při jednoosém střídavém zatěžování tah/tlak a frekvenci zatěžování 123 Hz

Závěr

Byla navržena metodika zkoušek korozní únavy za účelem stanovení podmínek iniciace korozních trhlin materiálu pro vodní turbíny ve vodě.

Byla získána první experimentální data.

Poděkování

Předložená práce vznikla díky projektu podporovaného TA ČR č. TN01000007 Národní centrum pro energetiku.

Literatura

- [1] Xin, L., Yongyao, L., Zhengwei, W. (2016): *A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, pp. 1-14.
- [2] Trudel, A. (2017): Recent trends in the design of hydropower components subjected to cycling and fatigue; towards improved technical design specifications. *Conference: Hydrovision International 2017*, At Denver, USA.
- [3] Varner, M.: *Vliv asymetrie kmitu na korozní únavu oceli 13%Cr,1%Ni*. http://www.davar.cz/corfat/pdf/Vliv_asymetrie_kmitu.pdf

KOROZNÍ CHOVÁNÍ AUSTENITICKÉ ŽÁROPEVNÉ 18CR-10NI OCELI V ZÁVISLOSTI NA TYPU CHEMICKÉ A STRUKTURNÍ MODIFIKACE

CORROSION BEHAVIOUR DEPENDING ON CHEMICAL AND MICROSTRUCTURE MODIFICATION OF AUSTENITIC CREEP- RESISTANT 18CR-10NI STEEL

Marie Svobodová, Josef Čmakal a Jindřich Douša

UJP PRAHA a.s.

Abstrakt

Príspevek se zabývá vzájemným porovnáním korozního chování rovných a ohnutých částí přehřívacích trubek vyrobených z austenitické žárovevné 18Cr-10Ni oceli ve dvou modifikacích, a to Sanicro 6R44 (1.4550/1.4912) a 347H FG (1.4908). Korozní chování těchto materiálů bylo hodnoceno jak pomocí gravimetrie, tak pomocí metalografického rozboru.

Abstract

The paper deals with comparison of corrosion behaviour of straight and bent parts of superheater tubes made of austenitic heat-resistant 18Cr-10Ni steel in two modifications, namely Sanicro 6R44 (1.4550/1.4912) and 347H FG (1.4908). The corrosion behaviour of these materials was evaluated by both gravimetry and metallographic analysis.

Úvod

Austenitická, niobem stabilizovaná, žárovevná ocel TP347H FG (X7CrNiNb18-10, WNr. 1.4908), tvoří spolu s ocelmi Super 304H a HR3C skupinu materiálů používaných nejčastěji pro přehřívací trubky nadkritických, resp. superkritických elektrárenských bloků pracujících s provozními teplotami páry až do 750 °C. Oproti standardní verzi TP347H má varianta TP347H FG zjemněné austenitické zrna o velikosti pohybující se podle ASTM E112 v intervalu G7 – G10, čímž získává vyšší odolnost proti parní oxidaci bez nutnosti shot-peeningové úpravy. Tato jemnozrná struktura je dosažena termomechanickým válcováním zahrnujícím žíhání naměkko. Ocel Sanicro 6R44, odpovídající podle obsahu uhlíku buď TP347 (0,04-0,06 hm. % C), nebo TP347H (0,06 – 0,10 hm. % C), má prakticky stejné chemické složení jako TP347H FG, jen má díky jednoduššímu způsobu výroby trubky větší velikost zrna uprostřed tloušťky stěny a rekrystalizovaná zrna pouze v blízkosti obou povrchů (vnějšího i vnitřního). Výrobci ji standardně dodávají ve stavu po výchozím tepelném zpracování (rozpouštěcí žíhání + kalení).

Rozdílnost korozního chování těchto dvou materiálů byla sledována především z pohledu vlivu výchozí velikosti zrna na korozní odolnost ohybů.

Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byly vybrány dvě trubky z materiálu TP347H FG a jedna z materiálu Sanicro 6R44 (jejich chemické složení je uvedeno v tab. 1):

TP347H FG – přehřívací bezešvá trubka o rozměrech OD 38 x 6,3 mm bez výchozího tepelného zpracování, dále značena jako 347H FG (VPE),

TP347H FG – přehřívací bezešvá trubka o rozměrech OD 44,5 x 7,11 mm po výchozím tepelném zpracování: rozpouštěcí žíhání při 1100 °C + kalení do vody, dále značena jako 347H FG (DTZ),

Sanicro 6R44 – přehřívací bezešvá trubka o rozměrech OD 38 x 7,1 mm po výchozím tepelném zpracování: rozpouštěcí žíhání + kalení, dále značena jako 347 (6R44).

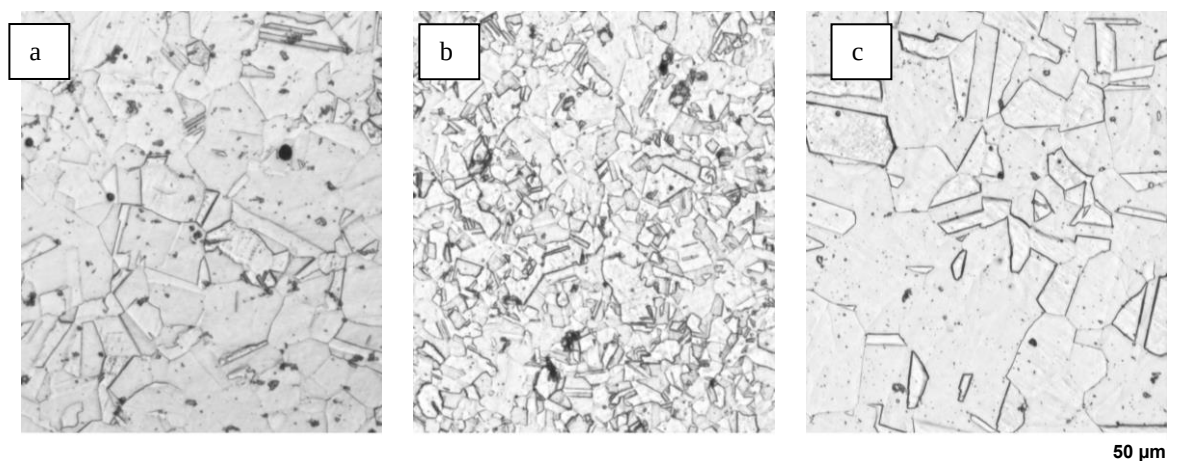
Tab. 1: Chemické složení použitých ocelí

Označení oceli	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Nb	Ti
norma 1.4908	0,06-0,10	max. 1,00	max. 2,00	max. 0,045	max. 0,030		17,00-19,00	9,00-13,00	8xC-1,10	
347H FG (VPE)	0,09	0,35	1,50	0,025	0,010		18,30	11,50	0,90	
347H FG (DTZ)	0,06	0,45	1,18	0,030	0,010	0,24	17,44	9,85	0,81	0,02
norma 1.4912	0,04-0,10	max. 1,00	max. 2,00	max. 0,045	max. 0,030		17,00-19,00	9,00-12,00	10xC-1,20	
347 (6R44)	0,05	0,66	1,65	0,030	0,010	0,39	17,86	10,00	0,71	0,01

Z trubek 347H FG (DTZ) a 347 (6R44) byly dále v DTZ s.r.o. v Liberci vyrobeny 90° ohyby za studena s poloměrem ohybu R 80 mm. Základní trubky i ohyby byly následně, po rozřezu na menší vzorky, vystaveny laboratornímu izotermickému žíhání v odporových pecích (na vzduchu) při teplotách 650 °C a 700 °C po dobu až 10 000 h. V průběhu laboratorní expozice (v časových řadách 50, 100, 500, 1 000, 3 000, 5 000 a 10 000 h) byly tyto vzorky gravimetricky hodnoceny, tj. váženy na analytických vahách s přesností na 0,00001 g, a po expozicích 650 °C/3 000 h (základní trubky) a 700 °C/1 000 h (ohyby) byly zality do pryskyřice a byl na nich připraven v příčném směru metalografický výbrus. K nim byly doplněny i metalografické výbrusy výchozích stavů, tj. všech základních trubek i ohybů.

Mikrostrukturní rozbor

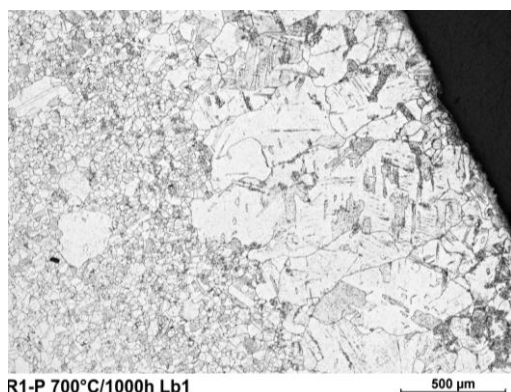
Snímky výchozí mikrostruktury jednotlivých základních materiálů (trubek) jsou ukázány na obr. 1. Ve všech případech je struktura oceli tvořena austenitickým zrnem s malým počtem dvojčat a s patrnou karbidickou disperzí, tvořenou precipitáty karbidů/karbonitridů niobu (stabilizační částice), karbidů titanu (stabilizační částice, ve výrazně menším počtu) a karbidů chromu.



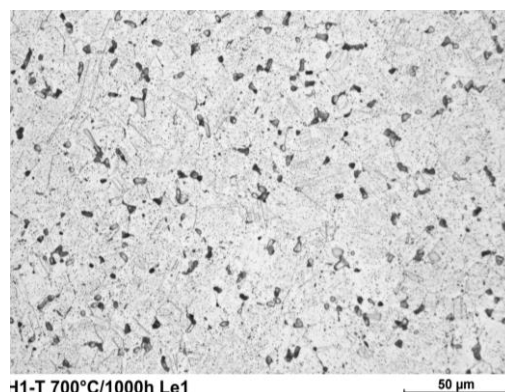
Obr. 1: Výchozí mikrostruktura základních trubek: a) 347H FG (VPE), b) 347H FG (DTZ), a c) 347 (6R44), všechny ve stejném zvětšení

Velikost zrn je ve všech variantách heterogenní: 347H FG (VPE) – jádro G7,5, povrchy G8,5 – G9,5; 347H FG (DTZ) – jádro G8 – G9,5, povrchy G9,5 – G10; 347 (6R44) – jádro G6,5, povrchy G6,5 – G8, těsně pod vnějším povrchem (asi 100 – 250 μm) je však do hloubky asi 1,45 mm pásmo zhrublého zrna s velikostí až G1. Toto pásmo zhrubnutí zůstává i ve struktuře ohybu oceli 347 (6R44), viz obr. 2, ovšem obsahuje mnoho transformačních dvojčat a skluzových pásů, také velikost zrna v jádru se mírně liší, pohybuje se v intervalu G4 – G6. U oceli

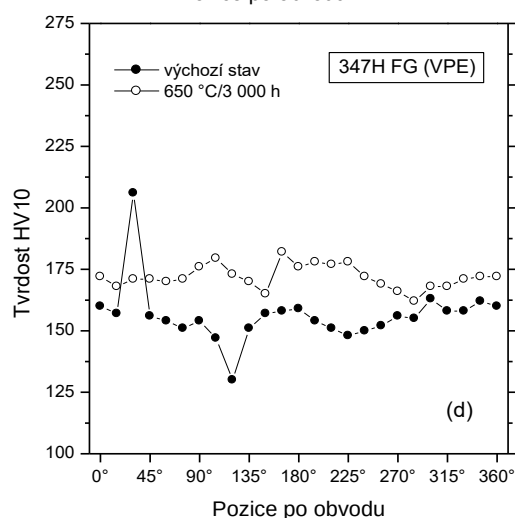
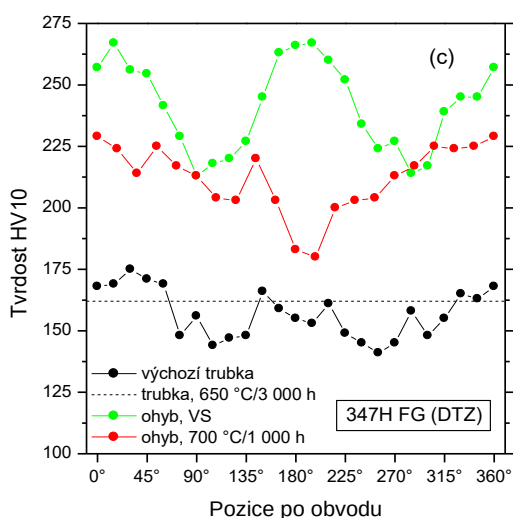
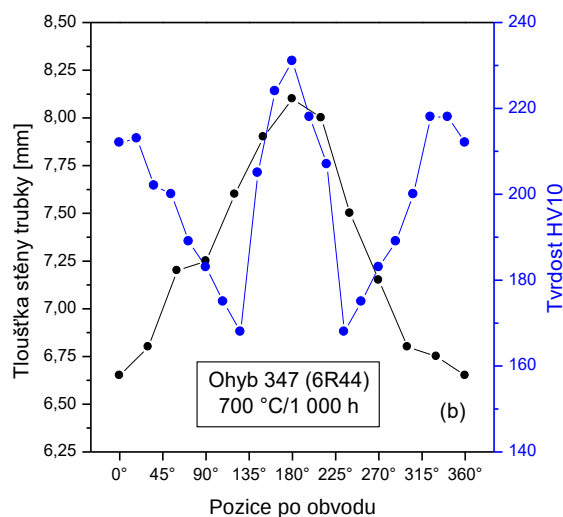
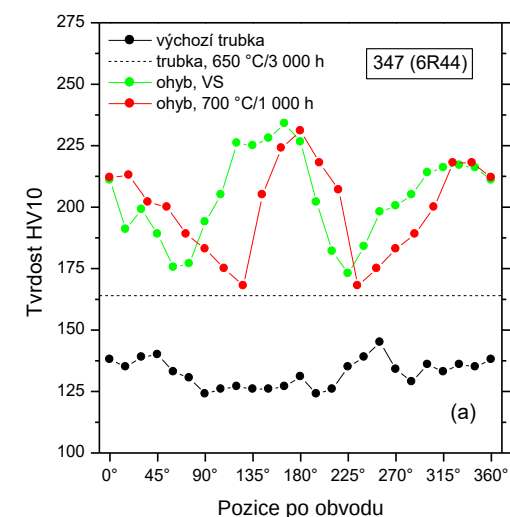
347H FG (DTZ) se ohnutí na mikrostruktuře významně neprojevilo. Ani izotermická expozice na teplotě 650 °C a 700 °C nezpůsobila hrubnutí zrna, ovšem došlo k masivní precipitaci křehké fáze sigma (obr. 3) ve všech vzorcích, což mělo vliv na tvrdost, jak ukazuje obr. 4.



Obr. 2: Vnější povrch tlačené části ohybu 347 (6R44) po expozici 700 °C/1 000 h s hrubozrnným pásmem



Obr. 3: Sigma fáze ve struktuře tlačené části ohybu 347H FG (DTZ) po expozici 700 °C/1 000 h



Obr. 4: Vliv expozice na tvrdost a,b) 347 (6R44), c) 347H FG (DTZ), d) 347H FG (VPE)

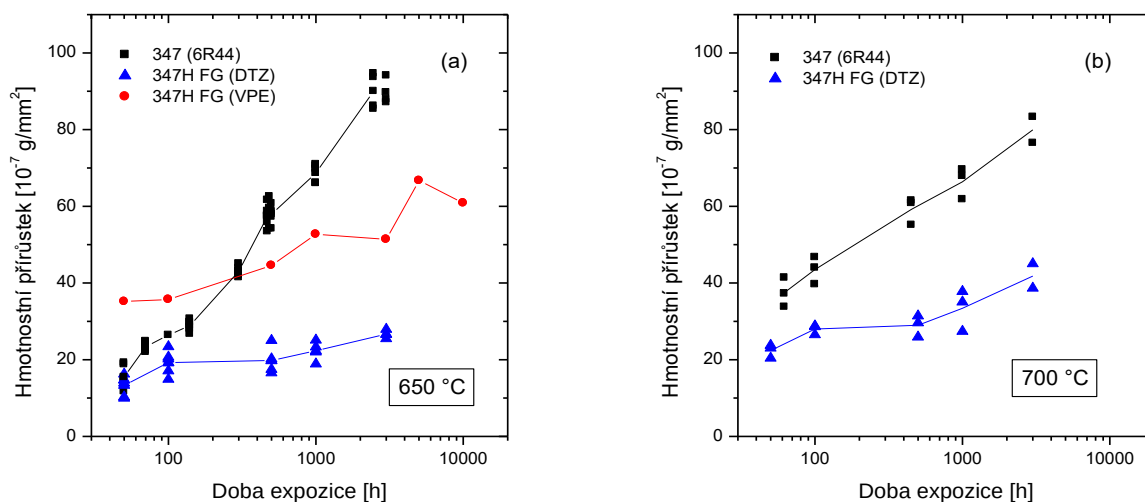
Na obr. 4 lze vidět, že především u základních trubek ocelí 347 (6R44) a 347H FG (VPE) došlo k významnému nárůstu tvrdosti vlivem precipitace sigma fáze. Ačkoliv v případě ohybu

347 (6R44) je významný nárůst tvrdosti (viz obr. 4b způsoben již původním vnesením plastické deformace, projevenou deformačními dvojčaty a skluzovými pásy. Naproti tomu tvrdost oceli 347H FG (DTZ) zůstává skoro neměnná, v případě ohybu dokonce dochází k jejímu poklesu. Tyto protichůdné jevy souvisí s množstvím, a především velikostí sigma fáze. Zatímco u oceli 347 (6R44) a 347H FG (VPE) po laboratorní expozici 650 °C/3 000 h sigma fáze zaujímá do 1 % plošného podílu s velikostí do cca 0,60 μm^2 , u oceli 347H FG (DTZ) má sigma fáze velikost až 2,5 μm^2 a její plošný podíl je 1,5 %. Po laboratorní expozici 700 °C/1 000 h vzroste množství a velikost sigma fáze v obou ohybem 347H FG (DTZ) i 347 (6R44) natolik (ohyb 347H FG (DTZ) – velikost 3,5 μm^2 , plošný podíl cca 5 %; ohyb 347 (6R44) – velikost 2 μm^2 , plošný podíl cca 2 %), že u oceli 347H FG (DTZ) způsobí pokles tvrdosti a u oceli 347 (6R44) zabrání k dalšímu nárůstu.

Protože sigma fáze precipituje především na hranicích zrn, její množství (plošný podíl) tak souvisí s původní velikostí zrna. Protože to bylo nejmenější u oceli 347H FG (DTZ), její velké množství hranic tedy umožnilo masivnější precipitaci sigma fáze. U ohybu 347 (6R44) umožnila větší precipitaci sigma fáze především přítomnost skluzových pásů a deformačních dvojčat.

Korozní chování

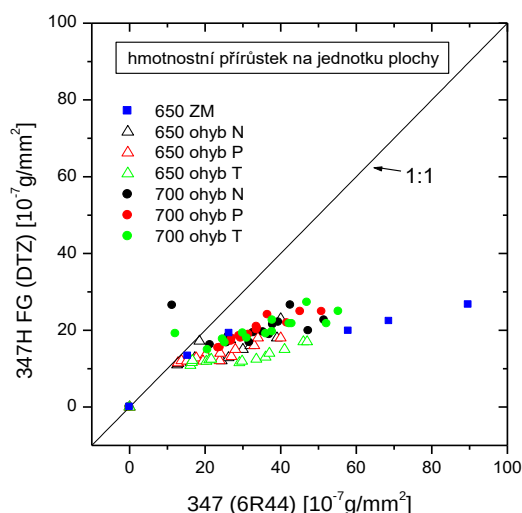
Výsledky gravimetrických zkoušek základních trubek všech tří studovaných ocelí ukazují grafy na obr. 5, jejichž logaritmická stupnice doby expozice umožňuje zachytit změny korozní rychlosti (změny nárůstu hmotnostního přírůstku na jednotku plochy 1 mm²). V případě expozice při teplotě 650 °C je u všech studovaných ocelí patrný rychlý nárůst korozní rychlosti (hmotnostního přírůstku) v prvních několika desítkách hodin. Ten se u variant s jemnozrnnou strukturou, tj. 347H FG (VPE) a (DTZ), následně zpomalí, aby po cca 1 000 h expozice opět zvýšil korozní rychlost. Naopak ocel 347 (6R44) vykazuje zpomalení velmi krátkodobé (mezi cca 60–110 h expozice), poté je její korozní rychlost prakticky konstantní a hmotnostní přírůstek prudce lineárně roste. Naopak během expozice při teplotě 700 °C počáteční zpomalení korozní rychlosti u oceli 347 (6R44) není vůbec patrné. Zato ocel 347H FG (DTZ) se chová zcela obdobně jako v případě teploty 650 °C.



Obr. 5: Výsledky gravimetrických zkoušek pro expozici při teplotě a) 650 °C, b) 700 °C

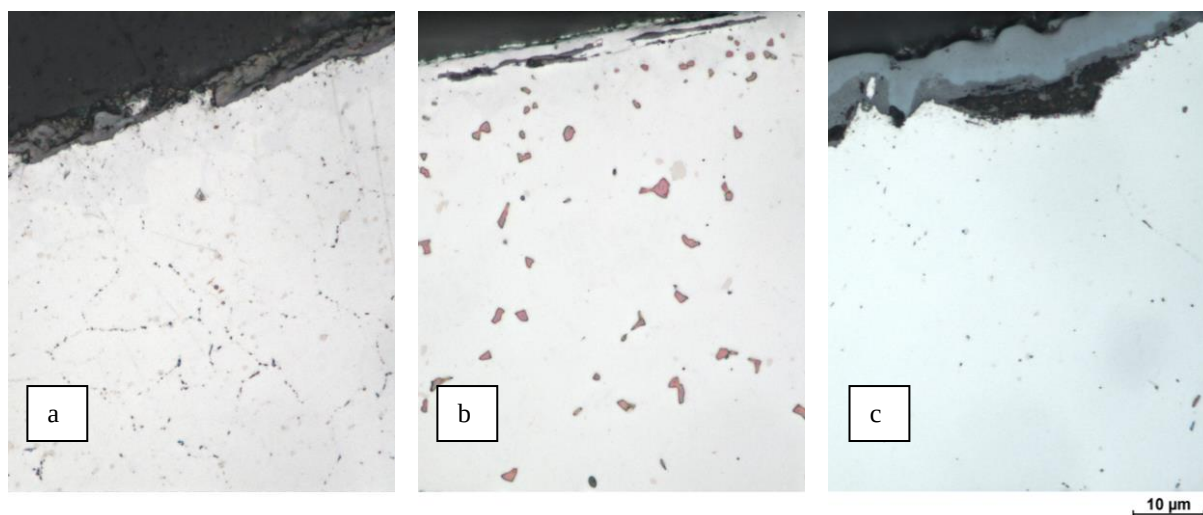
Korozní chování ohybů bylo sledováno jak při teplotě 650 °C, tak při teplotě 700 °C pro každou část ohybu zvlášť – tedy pro neutrální část (dále značeno N), taženou část (dále značeno T) a tlačnou část (dále značeno P). Protože vykreslení získaných výsledků formou grafů na obr. 5 by bylo příliš nepřehledné, jsou tyto výsledky zpracovány do porovnávacího grafu na obr. 6, kde na vodorovné ose jsou naměřené hmotnostní přírůstky na plochu 1 mm² pro ohyb 347 (6R44) a na svislé ose pro ohyb 347H FG (DTZ). V případě shodného chování obou mate-

riálů by všechny body grafu ležely na přímce označené 1:1. Z vykreslených dat je tedy zřejmé, že i v případě ohybů leží všechny body pod touto přímkou, tedy že ohyb 347 (6R44) koroduje rychleji, jak je tomu i v případě základních trubek. Navíc je ale také patrné, že kromě velmi nízkých hmotnostních přírůstků leží všechny body prakticky na jedné přímce nezávisle na předem vyvolané plastické deformaci, s pouze malou závislostí na teplotě expozice (body při 700 °C jsou posunuty blíže k přímce 1:1). Tuto skutečnost dokazují i dodatečně přidáné body ze základních trubek (ZM) exponovaných při teplotě 650 °C (modré čtverečky).

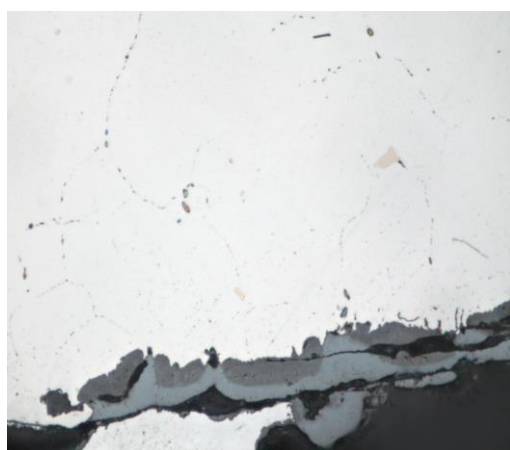


Obr. 6: Porovnání gravimetrických zkoušek ohybů

Gravimetrické hodnocení korozního chování bylo doplněno o metalografické hodnocení povrchových vrstev na metalografických výbrusech základních trubek studovaných ocelí po expozici 650 °C/3 000 h a na ohybech po expozici 700 °C/1 000 h. Ukázky vnějších povrchů základních trubek po 650 °C/3 000 h jsou uvedeny na obr. 7 a vnitřních povrchů ohybů po 700 °C/1 000 h na obr. 8 a obr. 9.



Obr. 7: Korozní napadení vnějšího povrchu základních trubek ocelí a) 347H FG (VPE), b) 347H FG (DTZ), c) 347 (6R44) po expozici 650 °C/3 000 h, vše při stejném zvětšení



R1-N 700°C/1000h Lf3

10 μm

Obr. 8: Korozní napadení vnitřního povrchu neutrální části ohybu 347 (6R44) po expozici 700 °C/1 000 h



H1-N 700°C/1000h Lf3

10 μm

Obr. 9: Korozní napadení vnitřního povrchu neutrální části ohybu 347H FG (DTZ) po expozici 700 °C/1 000 h

Z uvedených snímků na obr. 7 až obr. 9 jasně vyplývá, že hmotnostní přírůstek, zjištěný gravimetrickými zkouškami, je způsobován ve všech případech plošnou korozi, která začíná na nerovnostech povrchů a postupně prorůstá do celistvého pokrytí. Veliký rozdíl ve výchozích velikostech zrn tedy nemá prakticky žádný vliv na způsob koroze (u hrubozrnnější oceli 347 (6R44) nebyla pozorována mezikystalová koroze), pouze na precipitaci sigma fáze. Nicméně tloušťka oxidické dvojvrstvy, bohaté na železo (epitaktická část) a chróm (topotaktická část), se u jednotlivých materiálů liší, viz tab. 2. Z ní vyplývá, že korozní napadení vnitřního povrchu je buď srovnatelné s vnějším povrchem, nebo naopak o něco menší, v závislosti na původní výrobní kvalitě. Kromě oxidické dvojvrstvy lze lokálně pozorovat na površích například zcela zkorodované původní ořepy nebo tenkou vrstvičku patrně oxidu Cr_2O_3 .

Tab. 2: Průměrné celkové tloušťky oxidických vrstev sledovaných ocelí

Označení oceli	650 °C/3 000 h		700 °C/1 000 h					
	vnější	vnitřní	N - vnější	N - vnitřní	T - vnější	T - vnitřní	P - vnější	P - vnitřní
347H FG (VPE)	8 μm	6 μm						
347H FG (DTZ)	6 μm	6 μm	11 μm	8 μm	7 μm	8 μm	8 μm	9 μm
347 (6R44)	16 μm	10 μm	13 μm	14 μm	12 μm	9 μm	13 μm	12 μm

Závěr

Přestože sledované oceli se od sebe chemicky skoro neliší, jejich korozní chování je různé v důsledku rozdílné velikosti zrna u obou povrchů. Zatímco obě varianty oceli 347H FG mají průběh korozní rychlosti obdobný, jen varianta (VPE) začíná kvůli většímu počátečnímu zrně na vyšších hmotnostních přírůstcích, ocel 347 (6R44) s největším austenitickým zrnem koroduje rychleji, ale stejným mechanismem. Procesem ohnutí se tato skutečnost neovlivní.

Poděkování

Príspevek vznikl za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TH02020295.

HODNOCENÍ KVALITY PROVOZOVANÉHO HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE MEZI HLAVNÍM CÍRKULAČNÍM ČERPADLEM A HLAVNÍM CÍRKULAČNÍM POTRUBÍM S APLIKACÍ TRANSCOPY REPLIK

EVALUATION QUALITY OF HETEROGENEOUS WELDED JOINT BETWEEN THE MAIN CIRCULATION PUMP AND THE MAIN CIRCULATION PIPELINE WITH THE APPLICATION TRANSCOPY REPLICAS

Petr Ducháček, Marek Palán a Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s., Technika jaderných elektráren, Řízení zvláštních procesů a technické kvality,
e-mail: petr.duchacek@cez.cz, marek.palan@cez.cz, zdenek.cancura@cez.cz

Abstrakt

Příspěvek pojednává o výsledcích nedestruktivních a semidestruktivních kontrol na heterogenním svarovém spoji (HSS) mezi hlavním cirkulačním čerpadlem (HCČ) a hlavním cirkulačním potrubím (HCP) primárního okruhu JE typu VVER-1000. HSS spojuje hlavní komponenty primárního okruhu, které jsou pravidelně ověřovány, posuzovány a hodnoceny z hlediska zajištění jaderné a technické bezpečnosti zařízení.

Abstract

The article describes the results of the nondestructive and semidestructive controls on the heterogenous welded joint between the main circulation pump and the main circulation pipeline on the primary circuit of the Temelin Nuclear Power Plant type VVER-1000. The heterogenous welded joint connect the main components of the primary circuit, which are regularly checked, considered and evaluated for ensuring the nuclear and technical safety of the facility.

Úvod

Heterogenní svarový spoj je mezi ulitou HCČ, která je odlita z oceli 06Ch12N3DL a přechodkou, která je z tvářené oceli 10GN2MFA s korozivzdornými návary z vnitřního povrchu, viz obr. 1. HSS byl součástí dodávky HCČ typu 195M z výrobního závodu JSC „Sumy Frunze NPO“ z bývalého SSSR, byl zhotoven dílensky včetně následného tepelného zpracování.

Pro hodnocení kvality provozovaného svarového spoje byly použity níže uvedené nedestruktivní (semidestruktivní) metody:

- automatizovaná ultrazvuková kontrola – Phased Array,
- makrostrukturální hodnocení pravidelnosti kresby housenky a šíře tepelně ovlivněné zóny,
- mobilní spektrometrická kontrola chemického složení OES,
- repliková mikrostrukturální analýza (Transcopy),
- měření tvrdosti přenosným tvrdoměrem (HV10).

Hodnocení kvality svarového spoje HCČ s přechodkou HCP

Svarový spoj mezi HCČ s přechodkou HCP má vyšší heterogenitu oproti HSS na primárním okruhu mezi tlakovou nádobou reaktoru (TNR) z oceli 15Ch2NMFA a HCP. HSS ulity HCČ s přechodkou na HCP je svařována ocel martenziticko-austenitická s ocelí acikulárního feritu, tj. ocelí s vyšším rozdílem koncentrace chromu, iniciujícím difúzní tok uhlíku.

Chemické složení korozivodného Cr-Ni odlitku a podobně dvou návarů, stejně jako výplňového svarového kovu po tepelném zpracování, vede ke struktuře popuštěného martenzitu s nízkým podílem zbytkového austenitu s mezipaketovým uspořádáním. Tato feriticko-perlitická směs bainitického charakteru má ve svarovém spoji následné 3 morfologické alternativy dle intenzity odvodu tepla [4]:

- horní bainit (High-range) – granulární cementit,
- dolní bainit (Low-range) – intergranulární cementit – precipituje v řadách skloněných k podélné ose laťky pod úhlem 60°,
- acikulární ferit – bainitický ferit vytváří jednotlivé desky rostoucí do různých směrů (příznivá chaotická struktura).

Makrostrukturální hodnocení

Šířky korun HSS jsou dokumentovány na obr. 2. Celková tloušťka všech návarů se pohybuje kolem 8 mm, první návar dle dosažené tloušťky okolo 2 mm byl navařen druhou vrstvou o tloušťce přibližně 3,5 mm. Šířka TOO činila 3 – 4 mm, viz obr. 3.

Repliková mikrostrukturální analýza (Transcopy)

Mikrostruktury acikulárního feritu základního materiálu přechodky HCP z oceli 10GN2MFA (206±6 HV10) a popuštěné martenzitické struktury základního materiálu HCČ z oceli 06Ch12N3DL (251±7 HV10) jsou na obr. 4. Obr. 5 dokládá dvě alternativy dendritické struktury svarového kovu.

Závěry [2]

Svarové spoje HCČ s přechodkou HCP byly zhotoveny u ukrajinského výrobce HCČ jako výrobní svarové spoje dle postupů vycházejících z ruských předpisů pro práci s dotčenými základními materiály. Šířka a mikrostrukturální periodičita koruny svarového spoje ukazuje na 3 drátovou aplikaci metody svařování pod tavidlem.

Geometrie oblastí svarového spoje včetně návarů, jejich mikrostrukturální rozbor a měření tvrdosti potvrdily stabilitu feriticko-karbidických mikrostruktur a tím i vlastností svarových spojů.

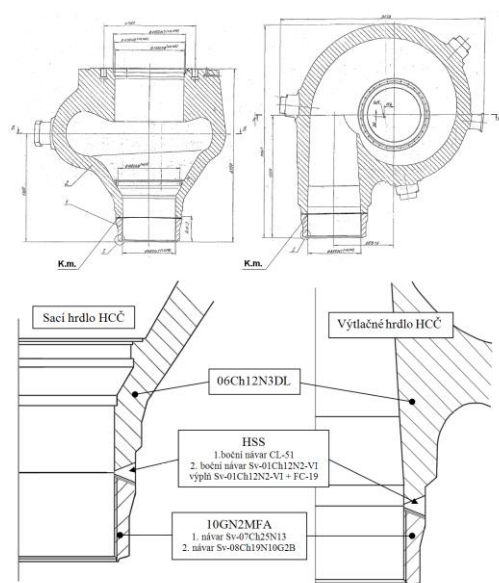
Vhodná volba přídatného materiálu svarových spojů a obou vrstev návarů stejně jako vnesené teplo při svařování a aplikace NTZ eliminovaly nárůst šířky tvrdých karbidických či intermedialních zón v oblasti linie ztavení a tím vyloučily možnost iniciace křehkých mikrotrhlin.

Hodnocení kvality svarových spojů mezi HCČ s přechodkou HCP provedená v roce 2019 obdobnými aktualizovanými experimentálními postupy rovněž prokázala vysokou kvalitu kontrolovaných heterogenních svarových kovů.

Použitá semidestruktivní metodika hodnocení kvality svarových spojů spolehlivě prokazuje, že životnost svarového spoje HCČ s přechodkou HCP u JE Temelín splňují požadavky na kvalitu svarových spojů v souladu s projektovanou životností.

Literatura

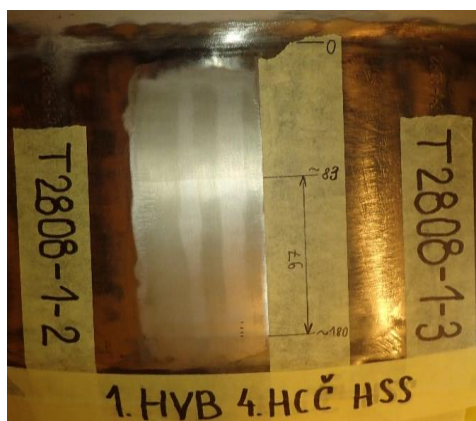
- [1] Ducháček, P. (2013): *Heterogenní svarové spoje nových žárovevných ocelí pro vysokoparametrické elektrárny*, Diplomová práce, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Praha.
- [2] Janovec, J., Horváth, J., Junek, M. (2019): *Posouzení heterogenního svarového spoje mezi HCČ a HCP replikovou metalografií*. Technická zpráva (interní dokument ČEZ, a. s.), č. 15-19, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Praha.



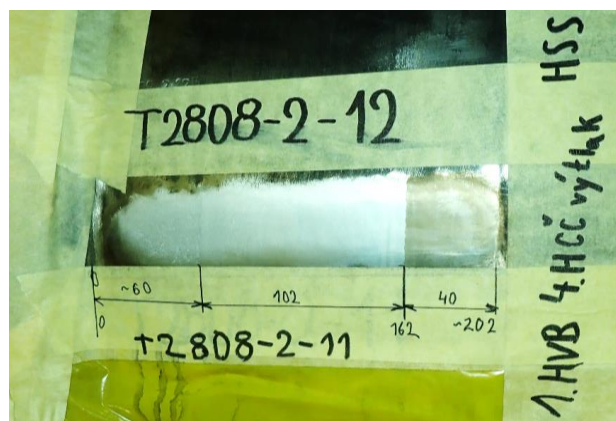
	C	Si	Mn	Cr	Ni
odlitek: 06Ch12N3DL	max. — 0,06	max. — 0,30	max. — 0,60	12,00 — 13,50	2,80 — 3,20
potrubí: 10GN2MFA	0,08 — 0,12	0,17 — 0,37	0,80 — 1,10	max. — 0,30	1,70 — 2,70
elektroda: CL-51	max. — 0,04	max. — 0,35	0,15 — 0,60	12,00 — 14,00	1,80 — 2,50
TIG drát: Sv-01Ch12N2-VI	max. — 0,03	0,15 — 0,50	0,20 — 0,70	11,00 — 13,50	1,60 — 2,50

	Mo	Cu	V	S	P
odlitek: 06Ch12N3DL	— — —	0,80 — 1,10	— — —	max. — 0,025	max. — 0,025
potrubí: 10GN2MFA	0,40 — 0,70	max. — 0,30	0,03 — 0,07	max. — 0,020	max. — 0,020
elektroda: CL-51	— — —	— — —	— — —	max. — 0,025	max. — 0,030
TIG drát: Sv-01Ch12N2-VI	— — —	— — —	— — —	max. — 0,020	max. — 0,030

Obr. 1: Hlavní cirkulační čerpadlo a svarový spoj k přechodce HCP, chemické složení jednotlivých komponent svarového spoje

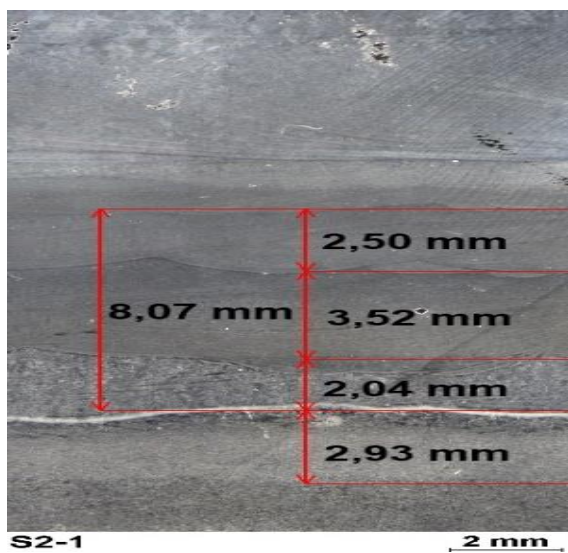


a)



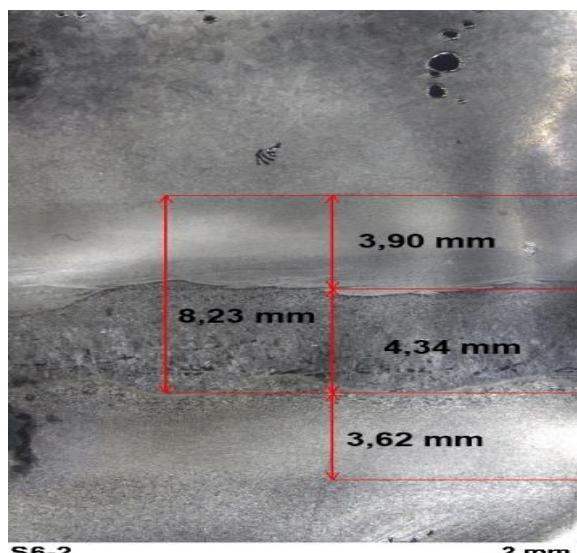
b)

Obr. 2: Makrostrukturální lept: a) sacího, b) výtlačného hrdla HCČ



S2-1

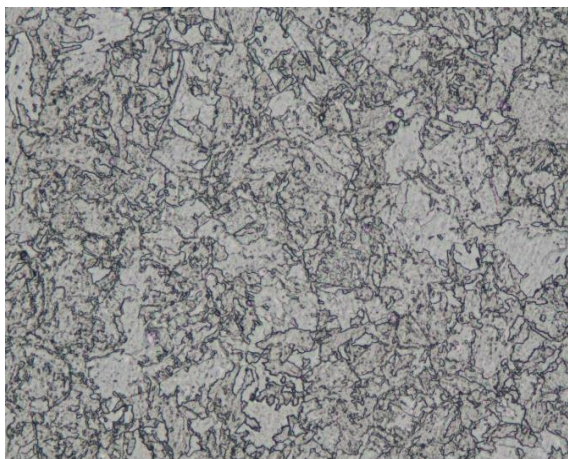
2 mm



S6-2

2 mm

Obr. 3: Vrstvy návarů a TOO



S1-1

50 μm

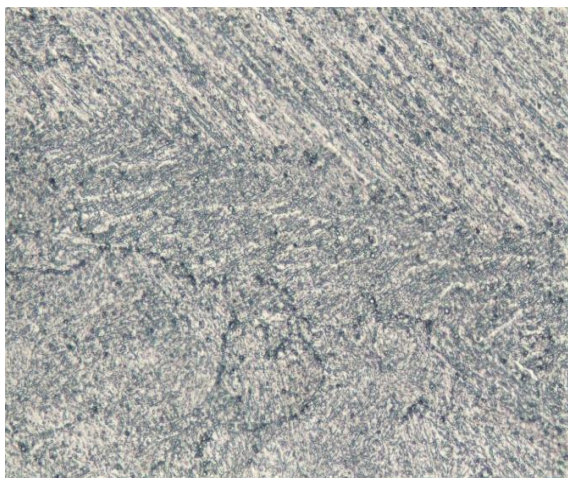
Obr. 4: Acikulární ferit – 10GN2MFA



S5-1

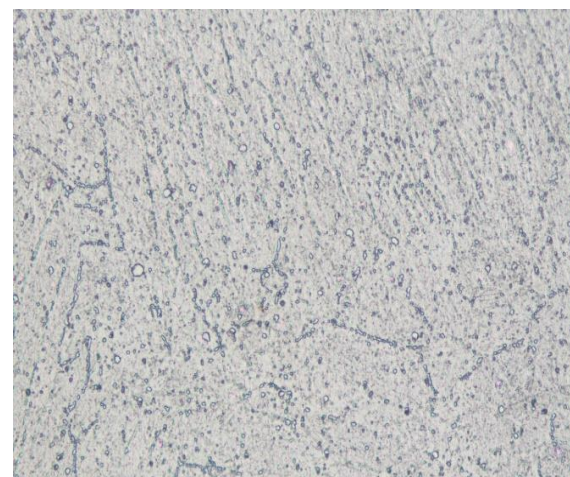
100 μm

Popuštěný martenzit – 06Ch12N3DL



S2-2

50 μm



S4-1

50 μm

Obr. 5: Dendritické mikrostruktury svarového kovu s různou rychlostí odvodu tepla

VYHODNOCENÍ ODBĚRU NÁVARU TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU NA TŘETÍM BLOKU JE DUKOVANY

ASSESSMENT OF REACTOR PRESSURE VESSEL CLADDING SAMPLING PERFORMED IN DUKOVANY NPP

Jakub Ertl

ČEZ, a. s., Řízení techniky JE

Abstrakt

Stanovení fluence rychlých neutronů dopadajících na TNR (tlakové nádoby reaktoru) JE Dukovany je prováděno prostřednictvím výpočtů korigovaných na výsledky měření aktivity monitorů umístěných v kontejnerech svědečných řetězců a na nosiči za TNR. Pro kvalifikaci metodiky stanovení fluence rychlých neutronů na vnitřní stěnu TNR byl v roce 2017 proveden odběr návaru TNR třetího bloku JE Dukovany a následné měření aktivity odebraných vzorků včetně jejich vyhodnocení. V tomto příspěvku jsou prezentovány dosažené výstupy a závěry.

Abstract

Assessment of fast neutron fluence on Dukovany RPVs is performed by calculations adjusted by activity measurements results of monitors located in containers of surveillance chains and monitors located behind RPVs. RPV cladding sampling of third unit Dukovany NPP was performed in 2017 in order to qualify the methodology for determining the neutron fluence on the inner wall of all Dukovany RPVs. Activity measurement of the cladding samples was compared with the results obtained according to the current methodology of fast neutron fluence assessment. The achieved conclusions are presented in this paper.

Úvod

Znalost hustoty toku, spektra a fluence rychlých neutronů dopadajících na vnitřní stěnu TNR je důležitým vstupem pro hodnocení jejich zbytkové životnosti z pohledu radiačního křehnutí. V normativech NTD A.S.I. [1] a VERLIFE [2] je požadováno získávat tyto veličiny kombinací výpočtových a experimentálních metod. Postup hodnocení fluence rychlých neutronů je nezbytné kvalifikovat srovnáním s veličinami získanými, pokud možno, čistě experimentálními postupy.

Odběr vzorků z návaru na vnitřní stěně TNR je jedinou možností, jak získat přímé experimentální výsledky pro kvalifikaci postupu hodnocení fluence rychlých neutronů na TNR. Vzorky z návaru obsahují mimo jiné železo, nikl a niob, což jsou prvky, které se celosvětově používají pro stanovení radiační zátěže v materiálech jaderných zařízení. Tyto prvky se využívají rovněž pro stanovení fluence rychlých neutronů na vnější stěně TNR a v řetězcích svědečného programu JE Dukovany. První odběr návaru TNR byl proveden na třetím bloku JE Dukovany v po 18. kampani v roce 2005 a v pořadí druhý odběr návaru stejné TNR byl proveden v roce 2017.

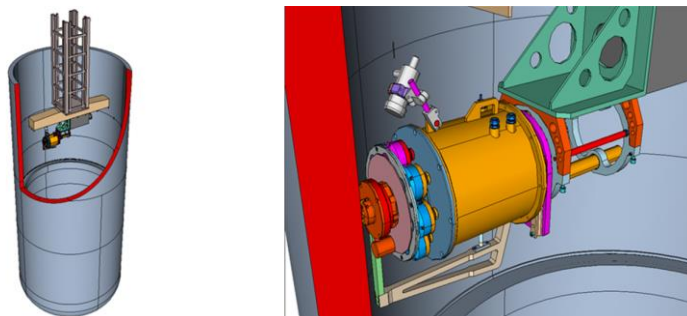
Izotop ^{93m}Nb obsažený v materiálu návaru TNR, vzniklý reakcí $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$ s poločasem rozpadu 16,13 roku, lze použít jako „integrátor“, tj. jako detektor měřící fluenci nezávisle na časovém průběhu ozařování po dobu srovnatelnou s poločasem rozpadu. Z tohoto pohledu se jevílo jako účelné odebrat v roce 2017 vzorky z návaru stejné TNR jako v roce 2005.

Technologie a konstrukce zařízení pro odběr vzorků

Technologie zvolená pro provedení odběru vzorků je frézování svislé mělké drážky, jejíž max. projektová hloubka je omezena na 1 mm. Svislé drážky byly zvoleny vzhledem ke gradientu neutronového pole. Z požadovaného množství vzorků z každého místa odběru byl navržen

tvár nástroje ve formě čelní dvoubřité frézy. Vyfrézované piliny byly odsávány proudem vody a zachycovány ve filtrech umístěných v hnízdech pro sběr vzorků.

Modul OVZ má 8 hnízd, což udává i počet možných odběrů provedených na jedno ponoření do TNR. Modul je ke své činnosti upevněn na manipulátor SKIN. Manipulátor umožňuje přesné polohování řezného nástroje, jeho pohyb a vizuální kontrolu procesu. S jeho pomocí se provede i defektoskopická kontrola vybraných míst před a po odběru. Konstrukční řešení modulu je na obr. 1.

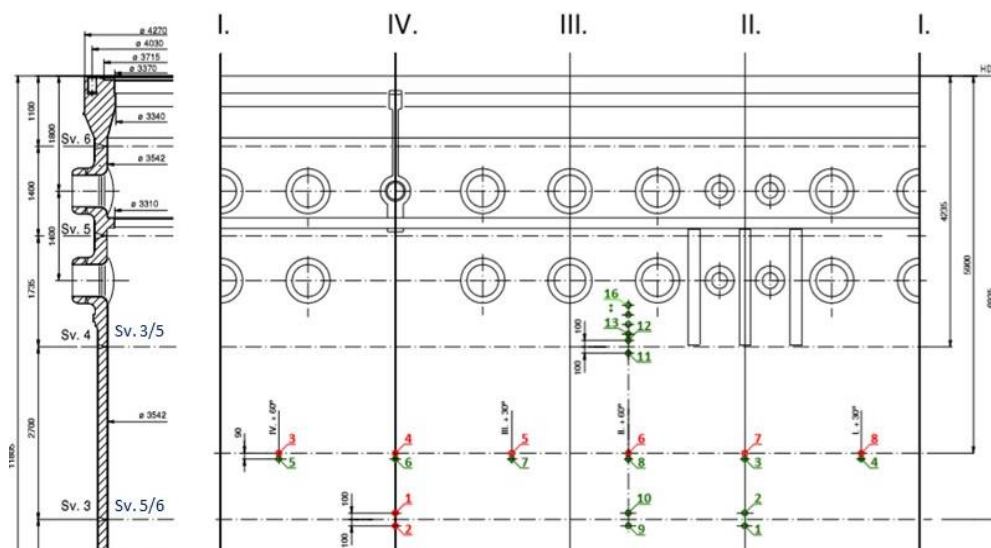


Obr. 1: Konstrukční řešení odběrového zařízení (Modulu OVZ)

Pro přesné stanovení aktivity niobu vyžadují jednotlivé laboratoře zpravidla vzorky o hmotnosti 100 mg. Spolehnout se na jediné měření by představovalo neúměrné riziko. Taktéž je potřebné minimálně jeden vzorek archivovat pro eventuální opakovanou analýzu, proto bylo zvolené minimální požadované množství odebraného materiálu z návaru (třísek) stanoveno na 300–500 mg z jednoho místa odběru.

Místa odběru vzorků

Místa odběru vzorků z roku 2017 jsou schematicky znázorněna na obr. 2 zeleně a místa odběru z roku 2005 červeně.



Obr. 2: Místa odběrů vzorků v roce 2005 (červeně) a 2017 (zeleně)

Výsledky odběru

Návar na vnitřní stěně TNR obsahuje několik prvků, které jsou používány pro aktivační metodu měření hustoty toku spekter a fluence neutronů. Pro pravidelné monitorování fluence rychlých neutronů na vnější stěně TNR jsou to především železo, nikl a niob, které byly na základě této skutečnosti využity rovněž pro vyhodnocení provedeného odběru z návaru TNR. V materiálu z odběrů byly změřeny aktivity nuklidů z následujících reakcí:

- $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$,
- $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$,
- $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{mNb}}$.

Ověření zeslabovacího koeficientu pomocí monitorů fluence

Monitorování fluence rychlých neutronů na EDU se kontinuálně provádí za TNR a orientační přepočít na vnitřní stěnu TNR se provádí pomocí koeficientu zeslabení získaného v modelových experimentech na reaktoru LR-0, který se nachází v ÚJV Řež. Ověřit věrohodnost tohoto koeficientu lze srovnáním aktivit ^{54}Mn a ^{58}Co změřených v odebraných vzorcích návaru a v monitorech ozářených na vnější stěně TNR.

Poměr hustoty toku před a za TNR, tj. koeficient zeslabení přes stěnu TNR, je dán vztahem

$$\frac{\Phi_{ef,i}}{\Phi_{ef,o}} = \frac{\sigma_{ef,o}}{\sigma_{ef,i}} \frac{A_i}{A_o}, \quad (1)$$

kde A je aktivita detektoru přepočítaná na konec ozařování (tj. konec poslední kampaně), σ_{ef} je efektivní účinný průřez pro energii nad 0,5 MeV pro spektrum změřené diferenciálními metodami v modelových experimentech [3], index i značí měření odběru návaru a index o značí měření za TNR. Výsledné koeficienty zeslabení jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Koeficienty zeslabení získané z odběrů 2005 a 2017

Reakce	2017	2005
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	5,71	5,62
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	5,67	5,60

V tab. 2 jsou uvedeny koeficienty zeslabení fluence spočítané pomocí odběru z návaru v roce 2005 a 2017. Koeficienty zeslabení jsou počítány jako poměr fluence z odběru návaru a fluence za TNR.

Tab. 2: Koeficienty zeslabení fluence

Odběr	Odběr/experiment zaTNR
zeslabení odběr 2005	5,73
zeslabení odběr 2017	5,42

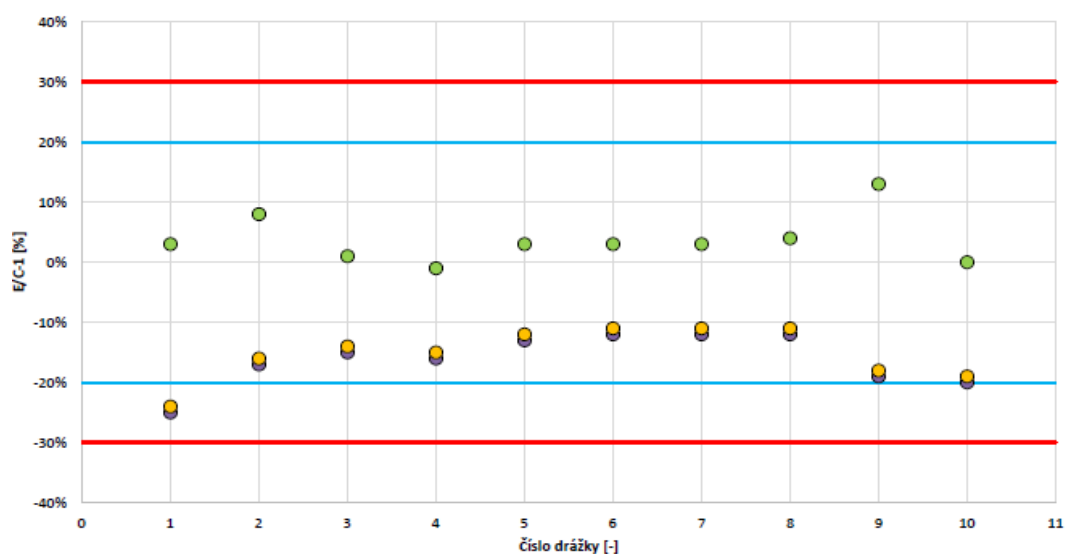
Stanovený koeficient zeslabení na základě odběru z roku 2017, který bude dále používán pro hodnocení fluence na vnitřní povrch TNR EDU, je 5,42. Dané zeslabení fluence je podílem experimentálně určené fluence na návar TNR na základě odběru z roku 2017 a experimentálních fluencí za TNR na základě monitorů umístěných na nosiči, které jsou zakládány každou kampaň. Jedná se o zeslabení stanovené experimentálně.

Porovnání fluencí

V rámci vyhodnocení odběru z návaru TNR EDU3 se porovnávaly také fluence na vnitřní povrch TNR určené experimentálně z odběru a fluence získané pomocí výpočetních kódů DORT a MCNP. Experimentální fluence byly získány pomocí adjustačního kódu STAYSL PNNL. Tento kód využívá metodu nejmenších čtverců k nalezení takového spektra, které nejpravděpodobněji odpovídá reakčním rychlostem odvozeným z naměřených aktivit ^{54}Mn , ^{58}Co a $^{93\text{mNb}}$.

Obr. ukazuje odchylky vypočtených hodnot fluence od experimentálně určených hodnot v místech drážek č. 1 až č. 10. Je zde vidět, že v oblasti úrovně středu AZ (drážky č. 3 až č. 8) jsou odchylky fluence výpočetně stanovené kódem MCNP (zelená barva) oproti experimentál-

ním fluencím menší než fluence výpočetně stanovené kódem DORT (fialová barva), který zde fluenci nadhodnocuje. Adjustace výsledků kódu DORT kódem LEPRICON (oranžová barva) v tomto případě fluence o něco zpřesní ale stále je nadhodnocena oproti experimentální hodnotě. V úrovni nad svarem 5/6 (drážky č. 2 a č. 10) jsou odchylky výpočtů MCNP stále nižší než 10 %. Odchylka výpočtu kódem DORT je pro drážku č. 2 nižší než 20 % a v případě drážky č. 10 odchylka činí 20 %. Pro úroveň pod svarem 5/6 (drážky č. 1 a č. 9) je odchylka výpočtu MCNP od experimentální hodnoty v místě drážky č. 9 nižší než 20 % a pro drážku č. 1 nižší než 10 %. Pro drážku č. 1 je odchylka výpočtu kódem DORT větší jak 20 %. Tato vyšší odchylka byla pravděpodobně způsobena vyšším gradientem hustoty neutronového toku a současně delší drážkou č. 1, která je cca dvakrát delší než ostatní drážky.



Obr. 3: Experimentální a vypočtené hodnoty $F_{0,5}$ v místech drážek č. 1 až č. 10

Závěr

Výsledky z odběru z návaru EDU3 provedeného v roce 2017 potvrzují správnost v současnosti používaných metodik stanovení fluencí na TNR EDU, které konzervativně nadhodnocují hodnoty fluencí. Identifikované odchylky jsou v souladu s požadavky NTD A.S.I. [1] a REGULATORY GUIDE 1.190 [4]. Všechny větší odchylky byly vysvětleny. Hodnocení odběru z návaru EDU3 bylo provedeno i referenčním kódem MCNP, který používá „best estimate“ přístup. Výpočet pomocí MCNP rovněž potvrdil správnost výsledků získaných pomocí současné metodiky.

Vzhledem k srovnatelnému způsobu provozování všech bloků EDU (obdobné: palivo, délka kampaně, vsázky a přibližně stejnému stáří všech bloků), lze výsledky získané na základě odběru z návaru na EDU3 aplikovat na ostatní bloky EDU.

Literatura

- [1] NTD A.S.I. (2017): *Normativně technická dokumentace A. S. I.*
- [2] VERLIFE (2013): *Unified Procedure for integrity and lifetime assessment of components and piping in VVER NPPs during operation.*
- [3] Holman, M. (1991): *Experimentální výzkum prostorově energetického rozložení neutronů ve vnitřním stínění lehkovodních reaktorů.* Disertační práce, Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni, Plzeň.
- [4] US NRC (2001): *Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence.* REGULATORY GUIDE 1.190, US DOE.

HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V RÁMCI APLIKACE STRATEGIE UDRŽENÍ CORIA PŘI TĚŽKÉ HAVÁRII. NÁVRH PROJEKTU OECD/NEA CAPS A VAZBA NA EXPERIMENT IVMR.

THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT WITH RESPECT TO THE CORIUM RETENTION DURING SA. THE OECD/NEA CAPS PROJECT PROPOSAL AND RELATION TO THE IVMR EXPERIMENT.

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Vladislav Pištora, Petr Gál, Vladimír Krhouněk a David Bátěk

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Nezbytným požadavkem na úspěšnost strategie udržení Coria uvnitř TNR při těžké havárii (severe accident, SA) je průkaz integrity tlakové nádoby reaktoru. Roztavené Corium uvnitř tlakové nádoby způsobuje tzv. efekt ablace, neboli výrazné zeslabení tloušťky stěny v závislosti na typu vrstev roztaveného Coria a tepelného toku. Vzhledem k zásadní důležitosti průkazu integrity TNR byl vypracován návrh projektu OECD/NEA. Zároveň pokračuje projekt EU HORIZON 2020 „IVMR“ s vazbou i na tento projekt. V prezentaci shrneme návrh postupu a nejdůležitější výsledky.

Abstract

Necessary requirement for success of the Corium retention strategy inside the RPV during the severe accident is the justification of the RPV integrity. Melted Corium inside the RPV leads to the “ablation” effect, in other words it is initiating significant RPV wall thinning with dependence on the Corium pool layers and heat flux profiles. With respect to this principal importance to justify the RPV wall integrity, the OECD/NEA project was prepared. At the same time the EU HORIZON 2020 “IVMR” project continues with strong relation on this project. In our presentation proposed procedure and most important results will be provided.

Úvod

V případě těžké havárie dochází uvnitř reaktoru k roztavení paliva a vnitřních částí reaktoru. Tím dojde ke vzniku tzv. bazénu roztaveného Coria na dnu tlakové nádoby reaktoru (TNR). Nutným předpokladem pro úspěšnost strategie IVMR (In Vessel Molten Corium Retention), tedy udržení taveniny Coria uvnitř reaktoru, je integrita TNR. V tomto případě na nádobu působí několik zátěžných stavů, které nebyly brány v úvahu při jejím projektu, jako např. vysoká teplota uvnitř, chladicí médium na vnější straně nádoby, ablace stěny TNR další. Pro správné posouzení integrity TNR je klíčové znát materiálové parametry i za vysokých teplot – až do teploty tavení materiálu nádoby. TNR je vyrobena z feriticko-perlitického materiálu 15CH2NMFA.

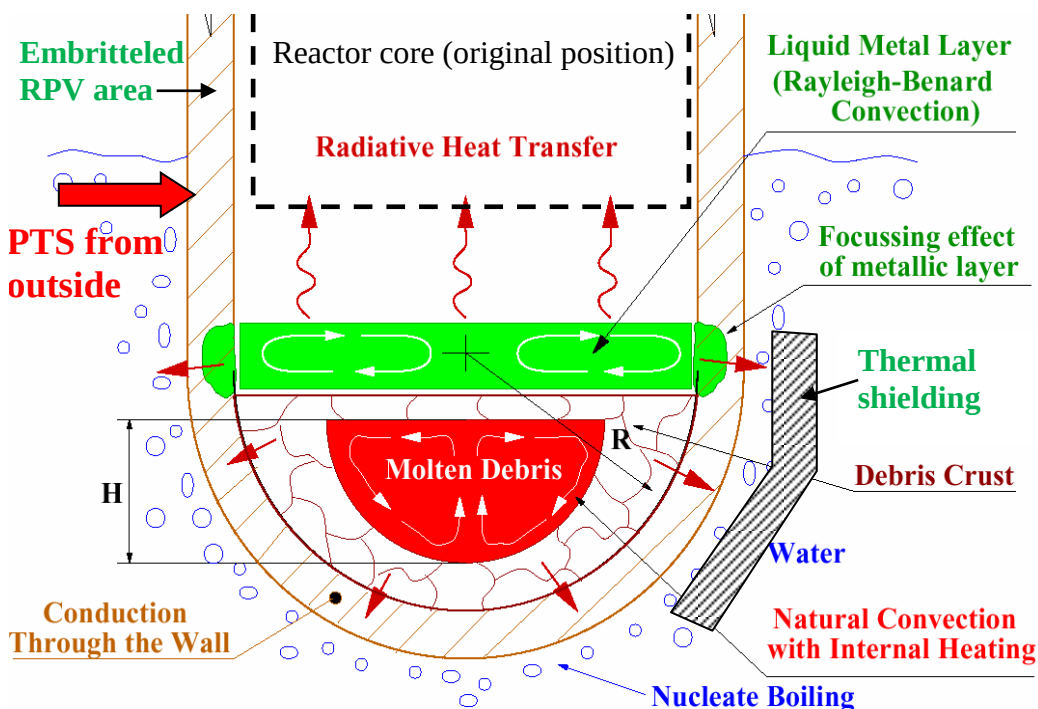
Posouzení TNR během SA

Zátěžné účinky během IVMR na tlakovou nádobu reaktoru

Tlaková nádoba je v případě události SA výrazně zatížena mimo projektové hodnocení. Mezi významné zátěžné účinky, které by měly být brány v úvahu, patří:

- Nadměrný tepelný tok od „bazénu“ Coria na stěnu dna TNR s uvážením efektu „fokusace“ na horní vrstvě Coria (v přechodu mezi dnem a válcovou částí TNR).
- Významný tepelný gradient po tloušťce stěny TNR s rozsahem teploty od cca 150 °C do teploty tavení materiálu. Významný gradient je vyvolán působením chladicí vody na vnějším povrchu a teplotou Coria na vnitřním povrchu TNR.

- Ve vztahu k vysoké teplotě Coria, nastává tzv. „ablation effect“ z vnitřní strany TNR a tím dochází k výraznému snížení tloušťky stěny. Tento jev je závislý na typu bazénu Coria (dvouvrstvá nebo třívrstvá konfigurace), což má za následek jeho různé umístění vzhledem ke dnu TNR. Více je k této problematice uvedeno v [1] a [2].
- Významný vliv creepu (tečení materiálu) na části dna TNR.
- Malé zatížení vnitřním tlakem.
- Zatížení hmotností taveniny a vlastní vahou TNR.



Obr. 14: Dno TNR během SA a ukázka nedůležitějších efektů

V případě IVMR by TNR měla být posouzena z následujících hledisek:

V případě ablace stěny TNR by měla zbylá tenká vrstva stěny TNR vydržet zatížení hmotností Coria a vlastní vahou, plus malé zatížení vnitřním tlakem.

Odolnost k náhlému lomu v případě teplotního šoku z vnější strany TNR v místě dna nádoby vyvolaného vnějším chlazením (teplota nádoby je při začátku chlazení vysoká, a naopak teplota chladiva je velmi nízká).

Zajištění dostatečné mezery mezi TNR a teplotním stíněním, nebo deflektorem – toto souvisí s teplotní deformací (roztlačností) TNR.

Posouzení TNR během SA pomocí MKP – statické hodnocení

Pro vyhodnocení TNR během SA je dostačující 2D rotačně symetrický konečně-prvkový model (MKP). Na MKP modelu bude řešena teplotně mechanická úloha. V případě teplotní úlohy jde o řešení nestacionárního rozložení teplotního pole ve stěně TNR. Do výpočtu vstupují okrajové podmínky přestupu tepla od bazénu s Coriem – vnitřní povrch. Dále teplota chladiva a koeficient přestupu tepla na vnějším chlazeném povrchu.

Do řešení je nutné zahrnout elasto-plastické a také creepové chování materiálu a zohlednit efekt ablace stěny TNR. Pro řešení takové úlohy je důležité znát materiálové parametry až do bodu tání materiálu (nestandardní požadavek). Většina materiálových parametrů je dostupná do teploty 350 °C, například [3]. To umožní zohlednit efekt ablace stěny TNR ve výpočtu.

Nutné materiálové vlastnosti, v rozsahu až do bodu tání, pro výpočtové posouzení:

Termo-fyzikální vlastnosti:

- hustota ρ , koeficient teplotní roztažnosti materiálu α , tepelná vodivost λ , měrné teplo c ,
- pro řešení efektu ablace latentní teplo tání a teplota tavení materiálu.

Mechanické vlastnosti získané pomocí tahových zkoušek:

- Youngův modul pružnosti E , mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , rovnoměrná tahová síla A_m a celkové prodloužení při roztržení vzorku A .

Creepové vlastnosti:

- Vstupní údaje pro creepový materiálový model v závislosti na teplotě a dostupné materiálové vlastnosti i z tlakových experimentálních testů.

Cíle výpočtového hodnocení pomocí MKP

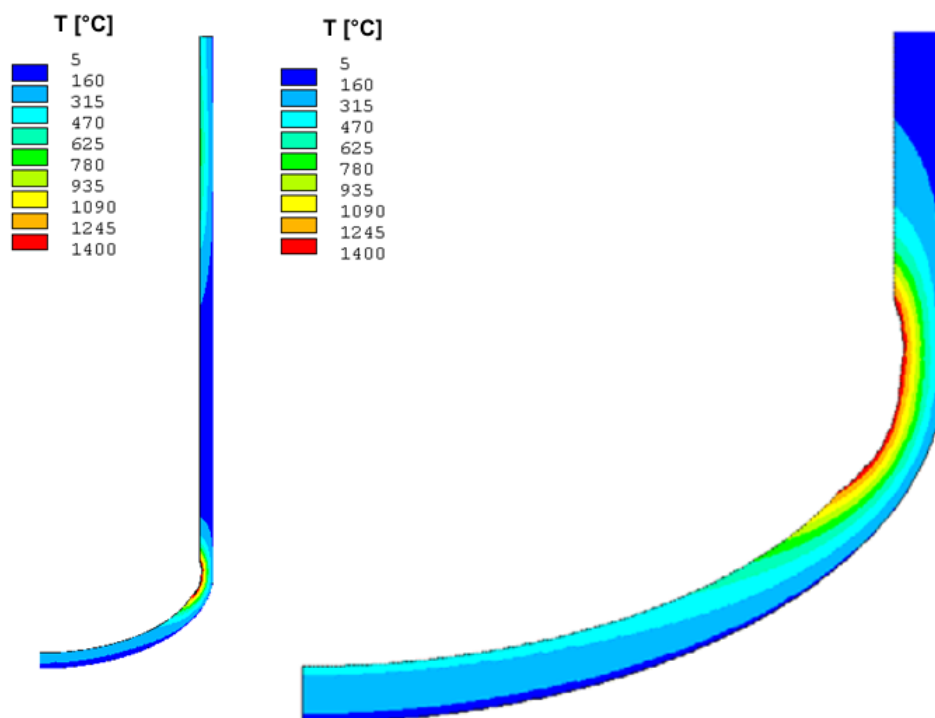
Z řešení je potřeba stanovit rozložení teplot a napětí ve stěně TNR. Vychází otázka, jakým způsobem hodnotit napjatost a stanovit dovolené napětí. Z důvodu velkého teplotního gradientu ve stěně TNR je velký rozptyl materiálových vlastností.

Vyhodnocení posunutí dna TNR ve vztahu k teplotnímu stínění (Thermal shielding, deflektor). V případě velkých posunutí by došlo ke zmenšení mezery mezi TNR a teplotním stíněním, nebo deflektorem. Při výrazném zmenšení mezery, by došlo ke ztrátě chlazení TNR z vnější strany.

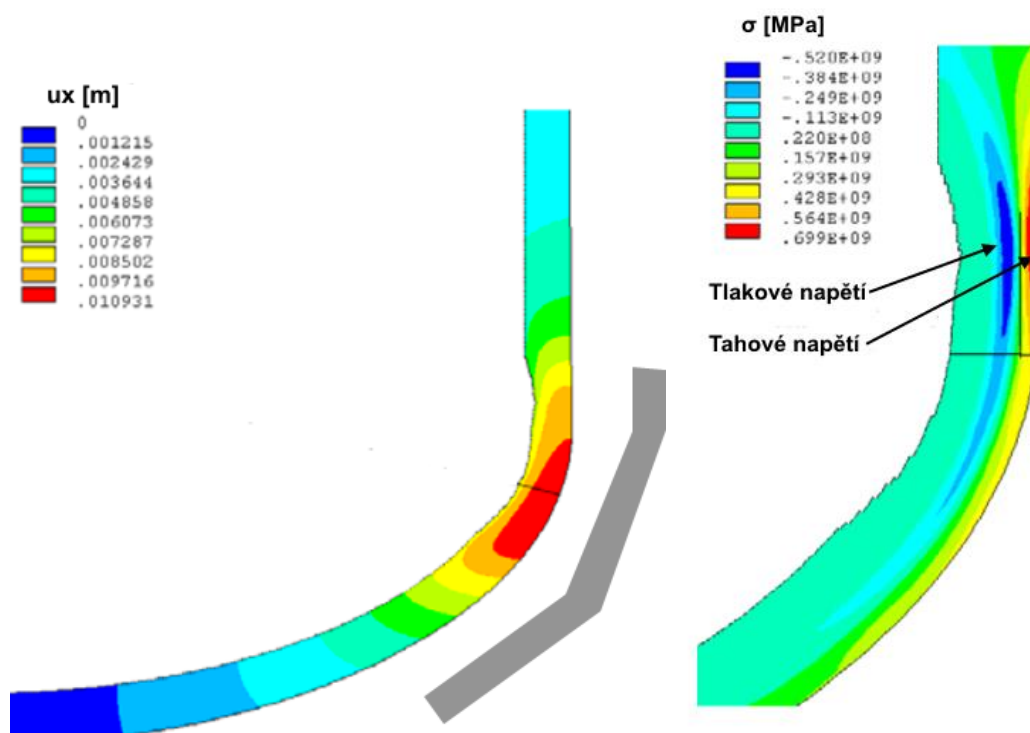
Dalším bodem výpočtového hodnocení je stanovení minimální tloušťky stěny TNR (ablation efekt) a vyhodnocení její únosnosti.

Níže jsou uvedeny ukázkové výsledky z výpočtového hodnocení v místě dna TNR při SA z benchmarku *OLHF-1* [4]. Z rozložení pole teplot (viz obr. 2) je patrné, že teplotní gradient je značně vysoký. Teplota se pohybuje od cca 150 °C do teploty tavení materiálu, cca 1300 °C. Z rozložení pole posunutí je patrné, že hodnota radiálního posunu dosahuje téměř 11 mm (viz obr. 3) a to v místě přechodu mezi dnem a válcovou částí TNR. Napjatost je v tomto místě ovlivněna snižující se tloušťkou stěny (ablation efekt) a také creepovým chováním materiálu. Na vnějším povrchu je napjatost tahová, zatímco uprostřed stěny TNR je napjatost opačné orientace, tedy tlaková.

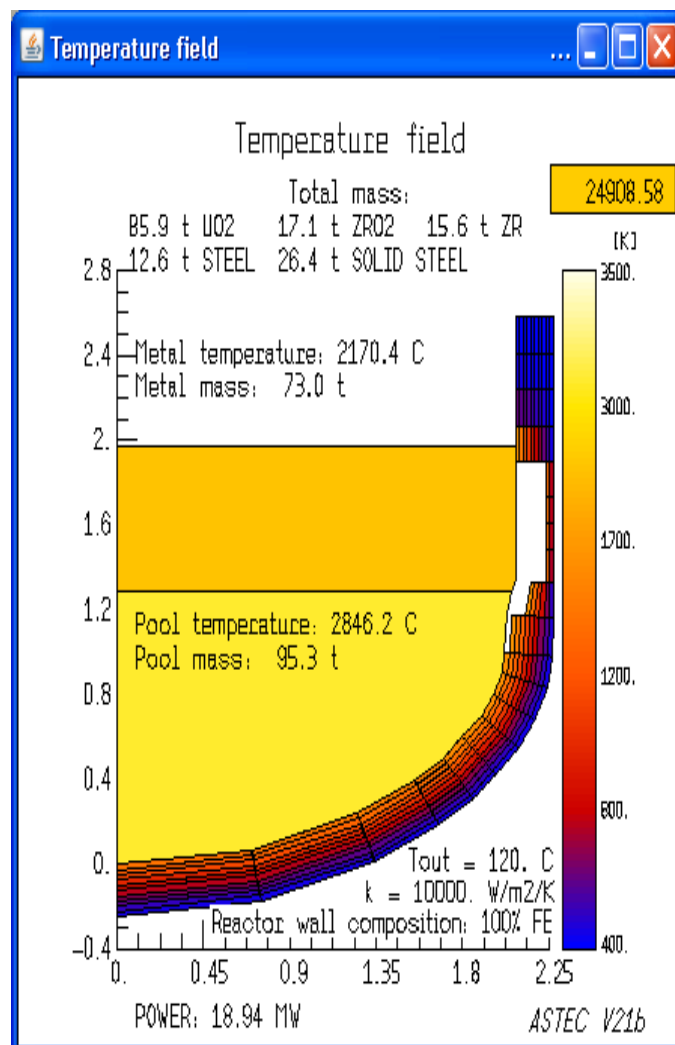
Na obr. 4 je uvedeno rozložení teplot ve dnu nádoby při SA v reaktoru *VVER 1000*. Jde o rozložení při dvouvrstvé konfiguraci bazénu. Hmotnost bazénu Coria je 95 tun a jeho teplota je cca 2250 °C po 7 hodinách. Je patrné, že v místě horní vrstvy došlo k odtavení stěny nádoby a zůstala pouze tenká vrstva materiálu, viz [5].



Obr. 2: Rozložení teplotního pole při SA ve stěně TNR, detail na dno TNR [4]



Obr. 3: Vykreslení pole posunutí ve dnu TNR a rozložení pole napjatosti v místě ablace vnitřního povrchu TNR [4]



Obr. 4: Rozložení teplotního pole v bazénu Coria (dvouvrstého) a ve dnu nádoby TNR se zohledněním ablace stěny [5]

Závěr

Byl popsán postup zhodnocení TNR při SA s cílem udržení taveniny Coria uvnitř nádoby TNR. Při SA je TNR značně nestandardně zatížena, a proto je důležité správně vyhodnotit její integritu. K tomu jsou potřebné materiálové vlastnosti z tahových zkoušek až do bodu tání materiálu a creepové zkoušky i při tlakovém zatížení. Z ukázkových výsledků je zřejmé, že efekt ablace stěny v místě přechodu dna a válcové části TNR bude mít významný vliv na chování nádoby. Mohlo by také dojít k významné redukci mezery mezi TNR a teplotním stíněním, deflektorem což by negativně ovlivnilo vnější chlazení TNR.

Protože integrita TNR při SA hraje zásadní roli, byl vypracován a podán návrh projektu OECD/NEA s názvem CAPS – RPV Integrity Assessment during IVMR ERVC SA. Dle prvotních předpokladů **bude projekt podpořen pracovními skupinami WGIAGE i WGAMA.**

Literatura

- [1] Loktionov, V., Mukhtarov, E., Lyubashevskaya, I. (2018): *Features of heat and deformation behavior of a VVER-600 reactor pressure vessel under conditions of inverse stratification of corium pool and worsened external vessel cooling during the severe accident. Part 1. The effect of the inverse melt stratification and in-vessel top cooling of corium pool on the thermal loads acting on VVER-600's reactor pressure vessel during a severe accident.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 326, pp. 320-332. ISSN 0029-5493
- [2] Loktionov, V., Mukhtarov, E., Lyubashevskaya, I. (2018): *Features of heat and deformation behavior of a VVER-600 reactor pressure vessel under conditions of inverse stratification of corium pool and worsened external vessel cooling during the severe accident. Part 2. Creep deformation and failure of the reactor pressure vessel.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 327, pp. 161-171. ISSN 0029-5493
- [3] http://steelcast.ru/steel_for_atomic_reactors
- [4] Nicolas, L., Durin, M., Koundy, V., et al. (2003): *Results of benchmark calculations based on OLHF-1 test.* Nuclear Engineering and Design, Vol. 223, pp. 263-277. ISSN 0029-5493
- [5] Grah, A., Sangiorgi, M., et al. (2016): *In-Vessel Melt Retention (IVMR), Analysis of a VVER-1000 NP – Study.* JRC TECHNICAL REPORTS, Joint Research Centre.

VÝVOJ A VÝROBA MĚŘICÍHO SYSTÉMU PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZMĚN GEOMETRIE PLÁŠTĚ AKTIVNÍ ZÓNY VČR VVER 1000 VYVOLANÉ DEGRADAČNÍM MECHANISMEM RADIAČNÍ BOBTNÁNÍ

DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF MEASURING SYSTEM FOR DETERMINATION GEOMETRY CHANGES BY CORE BAFFLE, REACTOR INTERNALS TYPE OF VVER 1000 CAUSED BY RADIATION SWELLING

Petr Vlček, Petr Vomáčka a Miroslav Žamboch

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Za současného působení toku rychlých neutronů a vysokých teplot vzniká degradační mechanismus (DM) „radiační bobtnání“. Tento degradační mechanismus u reaktorů typu VVER 1000 způsobuje makroskopické deformace pláště aktivní zóny (PAZ) reaktoru, a následně změnu geometrie PAZ. V současné době je tento DM v ČR hodnocen pouze výpočtově, pro průkaz dlouhodobého provozu je vhodné verifikovat rozvoj radiačního bobtnání (a creepu) a stav vlastní komponenty měřením přímo na díle.

Pro stanovení aktuálních rozměrů a pozdějších změn geometrie PAZ je v ÚJV Řež, a. s. vyvíjen unikátní systém pro měření rozměrů PAZ reaktorů VVER 1000. Měřicí systém je založen na měření absolutní vzdálenosti vybraných protilehlých ploch PAZ pomocí optických vláken a dotykových indukčních čidel. Měření je nutné provádět s velkou přesností (řádově desetin milimetru) na vzdálenost 3,3 m ve specifických podmínkách jaderného reaktoru.

Abstract

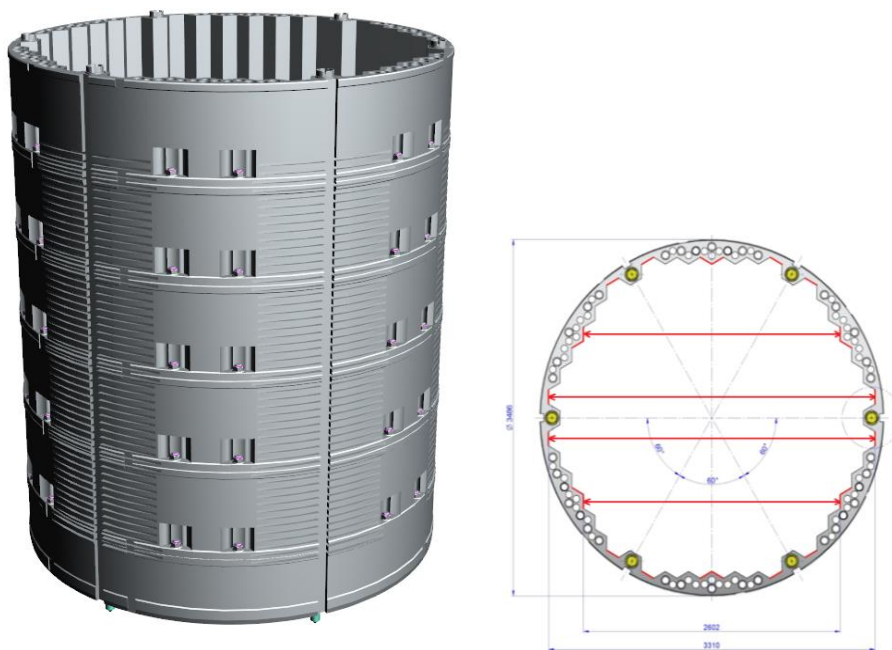
Degradation mechanism of radiation swelling is formed under the influence of fluxes of fast neutrons and high temperatures. Core baffle, part of RPV internals of VVER 1000 type, is affected of this degradation mechanism to lead of geometry change. In Czech Republic, change of core baffle geometry is currently determined only by computation modelling. Measurement of geometry change is necessary for long term operation.

A unique measuring system for measuring of core baffle geometry is being developed in ÚJV Řež, a. s. Measuring system is based on measurement the absolute distance of the core baffle opposed surface by using optical fibers and touch inductive sensors. Measurements must be made with great accuracy (tenths of a millimeter) over 3.3 m under specific conditions of the nuclear reactor.

Úvod

Degradační mechanismus (DM) „radiační bobtnání“ je relativně nově zjištěný degradační mechanismus, který je významně zkoumán až poslední dvě desetiletí. Požadavek na znalost o jeho rozvoji a projevech narůstá s požadavkem na zvyšování výkonů jaderných reaktorů, a tudíž i provozních parametrů, za kterých jsou provozovány. Rozvoj degradačního mechanismu radiační bobtnání je podmíněn výskytem vysoké teploty a velkou intenzitou ionizujícího záření v materiálu.

Podmínky pro jeho vznik u reaktorů typu VVER 1000 nastávají pouze u pláště aktivní zóny (PAZ) reaktoru (obr. 1). V současné době je tento DM v ČR hodnocen pouze výpočtově, ale při dlouhodobém provozu je potřebné verifikovat jeho projevy prostřednictvím měření na díle.



Obr. 1: Plášť aktivní zóny reaktoru VVER 1000 – ETE

Na základě výpočtů provedených firmami Gidropres [1] a ÚJV Řež, a. s. [2] byly predikovány projevy radiačního bobtnání u vnitřních částí reaktoru (VČR) pro 1. a 2. blok ETE. Předpokládá se, že tento jev způsobí nerovnoměrnou deformaci PAZ po výšce, ale především po obvodě prstenců PAZ. Vlivem nerovnoměrného působení pnutí a plastické deformace v jednotlivých segmentech PAZ může dojít k vychýlení části pláště AZ směrem k povrchu šachty nebo k palivovým souborům (dojde ke změně kruhovitosti).

Podle současných modelů a předpokládaného rozložení fluence radiace a teplot dle "modelové vsázky" ETE je rizikovým místem štěrbina mezi PAZ a šachtou. Dle provedeného hodnocení deformace PAZ vlivem radiačního bobtnání je předpovídána výraznější deformace PAZ směrem k šachtě, kde posun PAZ směrem k šachtě je zvýšen ještě vlivem teplotní roztažnosti (teplota PAZ je následkem gama ohřevu výrazně vyšší než teplota tenkostěnného válce šachty). Minimální vzdálenost mezi PAZ a šachtou je podle projektových výkresů stanovena 2,5 mm. Vlivem deformace dochází k uzavření této mezery přibližně při 28. kampani [2]. Toto platí pro „studený“ stav reaktoru při odstávce.

Posun PAZ směrem k palivovým souborům není podle výpočtů tak významná. Časový vývoj radiálního posunutí (ve směru k ose reaktoru) nejhoršího uzlu na vnitřním povrchu PAZ předpokládá posun do 3 mm za 60 let provozu, kdy mezera mezi palivovým souborem a vnitřním povrchem PAZ je 4 mm.

Na základě predikovaných radiálních deformací PAZ je navrženo provést měření skutečného stavu v místech, kde je predikován největší radiální posun směrem k ose a od osy reaktoru. Podle těchto hodnot bude ověřen celkový stav PAZ a verifikováno výpočetní hodnocení.

Design měřícího zařízení

Změna geometrie způsobená radiačním bobtnáním (a radiačním creepem) se projevuje zejména změnou kruhovitosti prstenců PAZ. Pro stanovení změn geometrie jsou využitelné různé techniky měření. Jedná se o měření kontaktní (mechanické) nebo bezkontaktní, které využívá k měření laser, ultrazvuk, případně jiné metody.

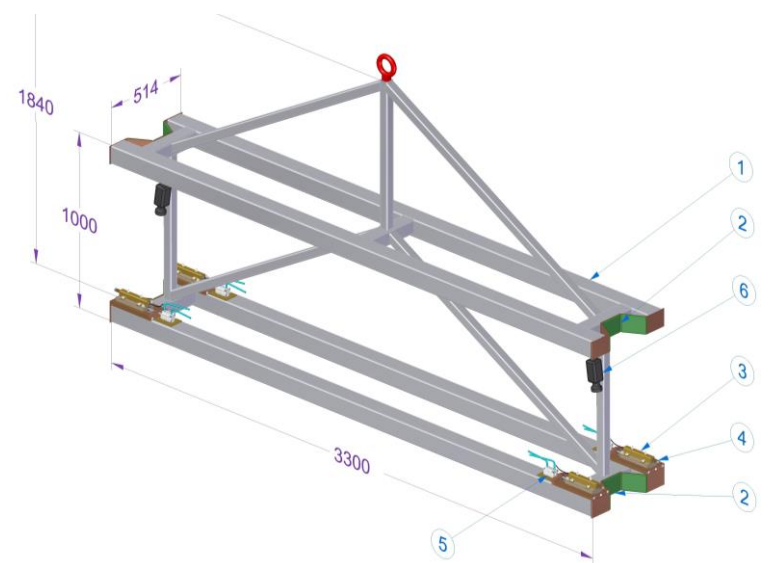
Pro volbu metody a způsobu měření je rozhodující splnění požadavků, které jsou kladené na vlastní měření, tj. přesnost a opakovatelnost měření, a realizovatelnost měření za podmínek, při kterých bude měření probíhat, tj. měření pod vodou za vysoké radiace. Dále měřicí systém musí splňovat podmínky a požadavky kladené na technologie používané pro měření v reaktoru. Důležitým faktorem je i cena měřicího systému.

Pro stanovení radiační zátěže na měřicí zařízení bylo provedeno měření dávkového příkonu ve středu aktivní zóny (ose reaktoru). Na základě těchto zjištěných hodnot byly dopočítány hodnoty dávkového příkonu pro jednotlivá místa uvnitř aktivní zóny reaktoru a u povrchu PAZ.

Zařízení je navrženo pro následující pracovní podmínky:

- Přesnost měřicího systému: min. $\pm 0,25$ mm pro vzdálenost 3,5 m (předpoklad $\pm 0,1$ mm).
- Pracovní teplota: 35–40 °C (max. 50 °C)
- Pracovní tlak: max. 0,15 MPa
- Prostředí: voda I.O. (roztok kyseliny borité) s radiací
- Radiační příkon u stěny PAZ: řádově 1000 Sv/hod

Na základě posouzení technik a informací dostupných v roce 2014/2015 bylo zvolena koncepce měření absolutní vzdálenosti protilehlých rovnoběžných ploch PAZ (obr. 2). Pro zajištění požadované přesnosti měření byla zvolena kombinace měření používající indukční dotyková čidla a optické délkové senzory.



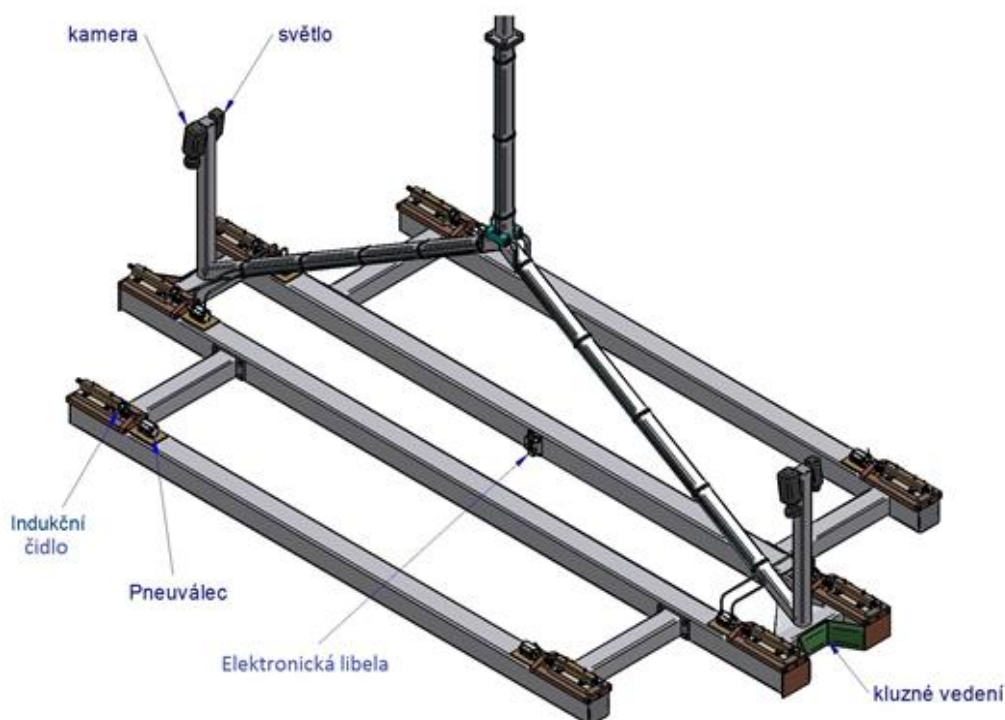
Obr. 2: Návrh měřicího zařízení z roku 2015

Měření vzdálenosti protilehlých ploch je současně prováděno na 4 měřících ramenech z nerezových hranolů, na kterých jsou připevněna měřicí čidla. Ramena jsou vzájemně spojena a jsou připevněna k transportní konstrukci (obr. 3).

Měření vzdálenosti je zajištěno použitím dvou indukčních dotykových čidel, které měří vzdálenost mezi měřícím zařízením (indukčním čidlem) a stěnou PAZ, a optického senzoru měřící vzdálenost mezi protilehlými indukčními čidly. Pozice měřicího zařízení, resp. náklon v ose měření je kontrolován elektronickou libelou. Měřená vzdálenost je ovlivněna i teplotou konstrukce a média v místě měření, proto jsou součástí měřicího systému teplotní čidla a při měření je prováděna teplotní kompenzace.

Pro manipulaci a kontrolu polohy jsou na každé straně měřicí konstrukce umístěny kamery. Informace ze všech přístrojů včetně obrazů z kamer jsou svedeny do řídicí jednotky, zpracované vstupy následně do počítače. Výsledkem je schematizované zobrazení polohy měřicí sestavy

vzhledem k PAZ se zobrazenými údaji od jednotlivých čidel a celková naměřená vzdálenost mezi protilehlými plochy PAZ.



Obr. 3: Desing vyráběného měřicího zařízení pro měření geometrie PAZ

Postup měření

Měření bude probíhat při revizi HCČ, kdy je vodní hladina v TNR upuštěna na úroveň spodních nátrubků HCP. Měřicí zařízení bude transportováno pomocí jeřábu do reaktoru, kde bude spuštěn na úroveň horní roviny PAZ. Pomocí kamerového systému bude zařízení v horizontální rovině úhlově natočeno do správné polohy pro měření a stanovena počáteční nulová poloha (pro osu Z-hloubku). Poté následuje spuštění měřicího zařízení do pozice pro měření. Zde dojde k vysunutí dotykových hrotů a změření vzdálenosti čidel na všech 4 ramenech.

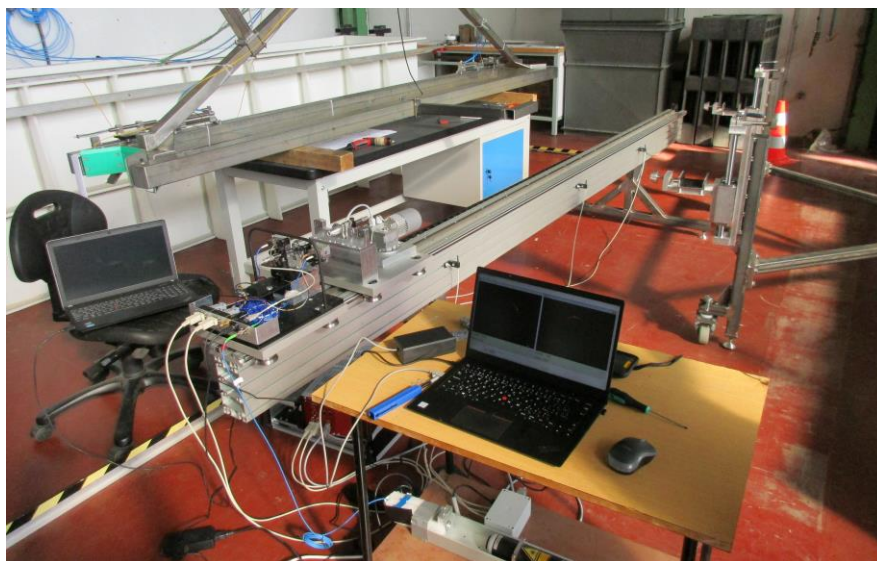
Měření vnitřního rozměru PAZ bude prováděno ve zvolených výškových úrovních – dle současného návrhu bude každý prstenec PAZ proměřován minimálně na 4 výškových úrovních. Po proměření rozměrů po celé výšce PAZ bude provedeno vyzvednutí měřicího zařízení nad horní plochu PAZ a horizontální pootočení o 60° a následné měření po celé výšce PAZu. Pootočení 2x o 60° zajistí změření po celém obvodu prstenců PAZ.

Kalibrace

Pro zajištění požadované přesnosti a opakovatelnosti měření je nutné před každým měřením na díle provést kalibraci měřicího systému. Ve spolupráci s ÚPT AV ČR byla navržena technologie pro kalibraci měřicího systému, resp. prototypu pro měření PAZu.

Vývoj vlastního kalibrační jednotky a provádění kalibrace bude realizovat ÚPT AV ČR, v.v.i., který disponuje zařízením pro stanovení přesnosti vyvíjeného měřicího zařízení, resp. prototypu. Kalibrační systém využívá pro kalibraci měřicího systému PAZ metody inkremen-

tální laserové interferometrie. Přesnost kalibračního systému je řádově vyšší než u navrženého měřicího systému a měření dosahuje přesnosti s odchylkou pod 5 μm .



Obr. 4: Prototyp testovaný v maketě PAZ

Harmonogram projektu

Vypracování studie realizovatelnosti a návrh koncepce měření probíhalo v letech 2014 až 2015.

Realizace projektu na vývoj a konstrukci měřicího systému pro rozměrovou kontrolu PAZ byla schválena v roce 2015. Projekt je realizován v letech 2016–2020. V první fázi projektu je konstruován prototyp měřicího zařízení, na kterém je ověřována navržená konstrukce a zvolená technologie měření.

Základní etapy projektu:

- 2016 – příprava projektu, úprava koncepce a výkresová dokumentace pro konstrukci prototypu, nákup a testování indukčních čidel,
- 2017 – výroba prototypu, zadání konstrukce hardware a vývoje software, konstrukční úpravy,
- 2018 – kompletace prototypu, zprovoznění elektroniky, hardwaru a aktivace software části, ověření radiační odolnosti součástí a komponent měřicího systému,
- 2019 – připojení kamerového systému, zprovoznění pneumatického systému, testování prototypu, kalibrace zařízení, výroba finálního zařízení.

Po kompletaci a oživení měřicího prototypu bylo provedeno testování za sucha v bazénu s maketou PAZ. Testy byly zaměřeny za ověření měřicího systému opakovaně provádět rozměrovou kontrolu a schopnost s prototypem manipulovat a umístit jej do makety PAZ.

Plán dalších činností:

- 2020 – dokončení konstrukce, testování měřicího zařízení, výroba transportních přípravků a beden pro uložení, tvorba dokumentace pro měření na JE,
- 2021-2023 – vlastní měření na ETE (mimo projekt).

Závěr

V ÚJV Řež, a. s. je vyvíjen a konstruován měřicí systém, který bude schopen průkazně dokumentovat stav a změny geometrie pláště aktivní zóny reaktorů typu VVER 1000 během provozu, a především při provozu za projektovou životnost VČR.

Tento měřicí systém je unikátní schopností přesně měřit délku na poměrně velkou vzdálenost cca 3,5 m ve zcela specifických podmínkách, které se vyskytují v reaktoru.

Naměřené hodnoty, které budou získány při měření PAZ po více než 20 letech provozu, budou vzhledem k velmi pomalému rozvoji radiačního bobtnání a creepu referenčními hodnotami pro stanovení tzv. nultého stavu PAZ a umožní sledovat změny geometrie PAZ způsobené uvedenými degradačními mechanismy v průběhu dalšího provozu. Naměřené výsledky budou jedním z průkazů o stavu VČR při prodlužování provozu bloku za projektovou životnost.

Výsledky měření budou i základem pro validaci výpočetního hodnocení DM radiačního bobtnání a následnou predikci tohoto degradačního mechanismu pro následný provoz.

Literatura

- [1] Мохов, В. А. (2011): *Повышение мощности реакторной установки блоков 1 и 2 АЭС «Темелин»: Расчет прочности и формоизменения выгородки в процессе эксплуатации*. Отчёт, 01-ТЕМ-EQ-12, Гидропрес.
- [2] Pištora, V., Lauerová, D., Anděl, J. (2014): *Hodnocení VČR ETE (plášť aktivní zóny) s uvažováním creepu a swellingu*. Technická zpráva, DITI 2301/332, rev. 2, ÚJV Řež, a. s., Řež.

ZMĚNY SLOŽENÍ A POROZITY ZRN TITANOVÉHO HOUBOVÉHO FILTRU MÉDIA PRIMÁRNÍHO OKRUHU SVO-1 PO DLOUHODOBÉM PROVOZU NA ETE

COMPOSITION AND POROSITY CHANGES OF TITANIUM GRAINS OF THE FILTER SVO-1 DEPURATING PRIMARY CIRCUIT MEDIA IN TEMELIN NPP AFTER LONG TERM OPERATION

Petr Brabec, Zdeněk Fencel a Libor Tomek

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Médium primárního okruhu ETE je průběžně čištěno Ti houbovým filtrem, jehož stav je mimo jiné monitorován SEM/EDS analýzou odebíraných vzorků. Složení a porozita filtru po 15 provozních kampaních byla porovnána s výchozími parametry Ti houby a odběry po 3 a 9 kampaních. Byla prokázána sorpce rozpuštěných látek i záchyt mechanických nečistot. Dlouhodobá expozice filtru v hydrotermálním prostředí média primárního okruhu se projevuje oxidací funkčního volného povrchu Ti zrn a postupným nárůstem objemu oxidických fází. Krystalizace oxidů v podobě rutilu, anatasu a ilmenitu postupně snižuje porozitu uvnitř Ti zrn. Celková porozita filtru však zůstává téměř neovlivněna.

Abstract

The medium of the primary circuit of the Temelín NPP is continually cleaned by a Ti sponge filter. Its condition is monitored by SEM/EDS analysis of the samples, as well. The composition and porosity of the filter after 15 operational campaigns were compared with the baseline parameters of the Ti sponge and sampling after 3 and 9 campaigns. Sorption of dissolved substances and capture of mechanical impurities was proved. Long-term exposure of the filter in the hydrothermal environment of the primary circuit medium causes oxidation of the functional free surface of Ti grains and a gradual increase of the oxidic phases volume. Crystallization of oxides in the form of rutile, anatase and ilmenite gradually decreases the porosity inside the Ti grains. However, the overall porosity of the filter remains almost unaffected.

Úvod

Filtr SVO-1 slouží k odstraňování nečistot z chladiva primárního okruhu. Skládá se ze čtyř funkčně nezávislých smyček a součástí každé z nich je filtr naplněný titanovou houbou. Od spuštění bloků je prováděna periodická kontrola Ti sorbentu z různých výškových úrovní filtru zaměřená na charakteristiku změn jeho složení a porozity. V akreditované Zkušební laboratoři oddělení Podpora provozu energetických zařízení ÚJV Řež, a. s. byly od počátku provozu elektrárny provedeny již 3 cykly hodnocení odebraných vzorků filtru. Společně s prvním odběrem po třech kampaních v roce 2005 byl charakterizován vzorek výchozího stavu Ti zrn houbového filtru z roku 2000 [1]. Další vzorky byly vyjmuty po devíti kampaních v roce 2011 [2]. Poslední odběr byl proveden v roce 2018 po patnácti kampaních [3]. Díky kontinuálnímu hodnocení je možné stav filtru sledovat a porovnávat v časové ose jeho provozní historie.

Metodika hodnocení

Charakterizace vzorků spočívá v dokumentaci morfologie vybraných zrn filtru, jejich chemického a fázového složení. Dále je sledována celková porozita filtru a vnitřní porozita zrn. Specifické rozdíly v metodice hodnocení vzorků v historii odběrů reflektují změny v zadání rozsahu analýz objednatelem.

V roce 2018 byly hodnoceny vzorky odebrané z výšek 140 cm a 170 cm sestavy filtru. Každý vzorek byl tvořen navážkou 10 g zrn o průměrné velikosti 1 mm. Příkon dávkového ekvivalentu

na povrchu ampule 350 $\mu\text{Sv/hod}$ kategorizuje zpracování vzorků z hlediska radiační ochrany do laboratoří v režimu Kontrolovaného a Sledovaného pásma. Povrch zrn filtru byl studován skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) na preparátu, tvořeném několika částicemi, fixovanými na samolepícím uhlíkovém terčíku. Morfologie povrchu částic byla dokumentována v sekundárních elektronech (SE) a zpětně odražených elektronech (BSE), které navíc dokáží zobrazit rozdíly v chemického složení povrchu.

Pro studium změn složení Ti zrn na jejich průřezu a hodnocení porozity byly připraveny metalografické výbrusy epoxidových vzorků fixujících částice filtru. Pro přípravu vzorku na rentgenovou mikroanalýzu chemického složení dostačovalo epoxidem zalít jen drobné množství zrn. Vzorek určený pro hodnocení porozity vyžadoval zapouzdření většího objemu částic (výška vrstvy 10 mm). Výbrusy byly připraveny standardním způsobem, tj. mechanickým broušením na metalografických papírech o zrnitosti 500-2400, leštěním pomocí diamantové pasty (zrnitost D 3 a D 0,7) a koloidní siliky v případě vzorku na měření porozity.

Obrazová dokumentace zrn, analýza jejich chemického složení a měření porozity filtru bylo prováděno na SEM VEGA TS 5130 XM s EDS analyzátozem chemického složení X-Max 80mm². Fázová analýza byla provedena metodou rentgenové práškové difraktometrie na externím pracovišti.

Morfologie a složení částic – odběr 2018

Povrch většiny dokumentovaných zrn je zcela pokrytý vrstvou idiomorfne vyvinutých krystalů. Největší krystaly přesahují velikost 10 μm . Krystaly na povrchu zrn titanového filtru jsou tvořeny oxidickými fázemi, vznikajícími reakcí média a v něm rozpuštěných látek s titanovou fází houbového filtru. Z výsledků rtg. mikroanalýzy a práškové difraktometrie vyplývá, že se jedná převážně o krystaly rutilu (fáze TiO_2), v menší míře anatasu (fáze TiO_2) a ilmenitu (fáze FeTiO_3). Mezi hodnocenými zrny Ti houby se v menšině vyskytují i zrna jejichž celý povrch není pokrytý nápadnými krystaly oxidických fází. Mezi jednotlivými krystaly oxidů nebo jejich shluky na povrchu těchto zrn je patrný hladký povrch. Nejde však o původní nepřeměněný povrch. Ze studia povrchu i příčného řezu vyplývá, že se jedná o topotaktickou vrstvu kryptokrystalického oxidu. Zrna Ti filtru s členitým povrchem mají tendenci být zcela pokryta epitaktickou vrstvou idiomorfne omezených krystalů oxidů. Ti zrna s méně topograficky výrazným oblým povrchem bývají spíše pokryta topotaktickou vrstvou oxidů, zachovávající původní hladký povrch zrna, na kterou místy nasedají epitaktické idiomorfní krystaly nebo jejich shluky. Na povrchu zrn Ti houby byly v BSE ojediněle zastiženy výrazně světlé částice s vysokým obsahem Zr.

Ze studia Ti zrn filtru v příčném řezu vyplývá, že celý jejich povrch je pokrytý oxidy (TiO_2 , FeTiO_3). Oxidy pokrývají stěny pórů, štěrbin a prasklin uvnitř jednotlivých zrn. Úzké štěrbin, praskliny a menší póry jsou oxidickými fázemi zcela vyplněny. Obecně lze konstatovat, že vrstva oxidů na volném povrchu zrn nedosahuje takové tloušťky jako na stěnách pórů uvnitř zrn. Podmínky pro krystalizaci oxidů jsou patrně na povrchu zrn méně příznivé než v uzavřenějším systému pórů a štěrbin uvnitř zrn. Zr částice s malou příměsí Sn zastiženy při dokumentaci povrchu byly pozorovány i v příčném řezu Ti zrn filtru. S největší pravděpodobností pocházejí z konstrukčního materiálu nosné sestavy palivového souboru. V bodových a plošných analýzách zrn houby byly vedle nejběžnějšího Fe dále zastiženy i příměsí následujících prvků: Mn, Ni, Cr, Si, Al, Zn.

Stanovení porozity – odběr 2018

Hodnocení porozity bylo provedeno metodou prahování BSE obrazů nasnímaných v SEM. Celková porozita vrstvy byla měřena na patnácti náhodně vybraných místech při zvětšení 60x a 150x. Výsledky celkové porozity při obou zvětšeních vyšly totožně. Dále byla hodnocena vnitřní porozita zrn a procentuální zastoupení oxidů v zrně. Všechna stanovení byla provedena pro oba vzorky filtru odebrané z výšky 140 a 170 cm. Výsledky měření shrnuje tab. 1

Tab. 1: Střední hodnoty měření porozity a zastoupení oxidů z výšky 140 a 170 cm filtru v %

Výška odběru filtru	140 cm	170 cm
Celková porozita	62	61
Porozita zrn	7	15
Podíl oxidů v zrně	18	17

Srovnání průměrných hodnot celkové porozity z různé výškové úrovně ukazuje téměř shodné hodnoty. Stejný výsledek platí pro objemové zastoupení oxidů v zrně. Rozdíl v porositě stanovené uvnitř zrn obou vzorků je dán malým souborem měření vzhledem k velké variabilitě vnitřní porozity mezi jednotlivými zrny i jejich částmi. Rozdíly jednotlivých měření vnitřní porozity se pohybovaly od 2 % do 42 %.

Změny složení filtru v provozní historii

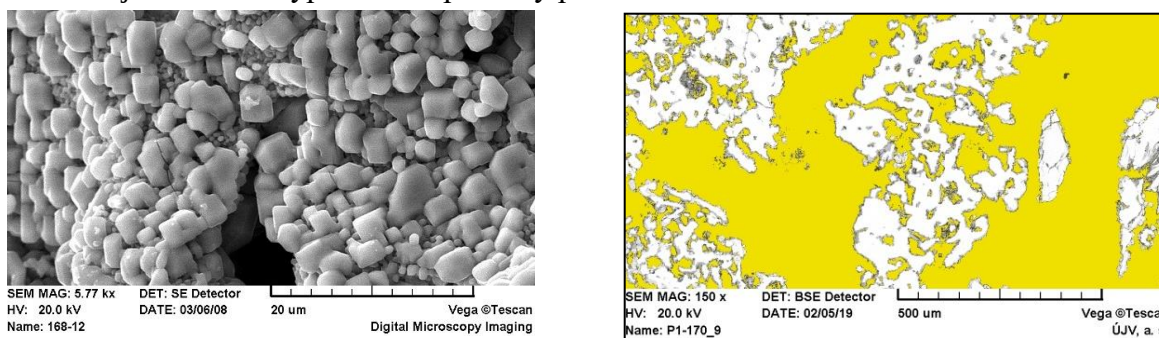
Zrna Ti houbového filtru ve výchozím stavu mají značně členitý povrch a obsahují velké množství pórů různé velikosti. Houbovitá zrna filtru, tak disponují obrovským funkčním povrchem. Čistý titan se na vzduchu velmi rychle pasivuje, což potvrdily analýzy povrchu zrn i jejich leštěných příčných výbrusů. Přítomnost tenké pasivační oxidické vrstvy se v analýzách provozně neexponovaných zrn Ti filtru odráží v přítomnosti až 5 hm. % kyslíku.

Dlouhodobá expozice filtru v hydrotermálním prostředí média primárního okruhu se projevuje oxidací funkčního volného povrchu Ti zrn a postupným nárůstem objemu oxidických fází. Hodnocením po 18 letech od instalace filtru bylo zjištěno pokrytí kompletního povrchu zrn oxidy, vytvářejícími na povrchu Ti zrn nárůsty dokonale omezených krystalů. Oxidy pokrývají stěny pórů a zcela vyplňují štěrby uvnitř zrn. V současné době oxidy zaplňují 18 % z celkového prostoru uvnitř zrn. Celkovým prostorem uvnitř zrn rozumíme součet objemu hmoty pevné fáze a objemu pórů. Oproti roku 2012 je znát určitý progres v nárůstu oxidické fáze, což se projevuje snížením porozity uvnitř zrn. Nárůsty oxidů na površích Ti zrn byly zjištěny již při hodnocení prvního odběru po třech provozních kampaních (rok 2005). Nově vznikající fáze ve filtru jsou tvořeny především produktem reakce Ti-O ve formě TiO₂. Převládá rutil, méně je zastoupen anatas. Další oxid, který se v Ti houbě poměrně běžně vyskytuje je ilmenit FeTiO₃, který vzniká za účasti Fe, rozpuštěného ve filtrovaném provozním médiu. Méně často bylo Fe a Cr v příčných řezech zjištěno v podobě intersticiálního pevného roztoku s Ti. Ojedinelé částice Zr, v některých případech doprovázené příměsí Sn, pocházející pravděpodobně z materiálů nosných částí palivového souboru, se v historii analýz odběrů objevují pravidelně. V analýzách předchozích odběrů se dále vyskytují i další doprovodné prvky, zastižené často pouze jen ojediněle (Mn, Ni, Si, Al, Zn, P, V, Sn, B). Vzhledem k lokálnosti analýz, subjektivnímu výběru analyzovaných míst a nestejnému poměru měřených zrn nemá přílišný význam diskutovat rozdíly v průměrném kvantitativním zastoupení zjištěných prvků. I přes tato omezení lze konstatovat, že od posledního odběru nedošlo ve filtru k významnému nárůstu zachytu žádného prvku oproti minulosti. Významnější rozdíly mezi charakteristikou vzorků z různých výškových úrovní filtru nebyly zaznamenány.

Výsledky stanovení porozity lze porovnat z měření vzorku ve výchozím stavu a z odběru v roce 2018. V mezidobí nebyla porozita odběrů stanovována. Členitý povrch zrn Ti houby způsobuje při směštnání částic v násypu filtru přítomnost velkého objemového podílu mezizrnového prostoru, což se odráží ve vysoké hodnotě celkové porozity filtru. Pro neexponovaný ma-

terál byla zjištěna celková porozita 63 %. Dlouhodobé provozní zatížení filtru nesnížilo jeho celkovou porozitu ani o celá 2 %. Fázové změny a mechanické záchyty nečistot uvnitř zrn způsobily snížení vnitřní porozity zrn dle měření z originálních 17 % na současnou hodnotu 11 %.

Poměrně zajímavým údajem je stanovení procentuálního zastoupení oxidů v zrně, které v následujících letech pravidelných kontrol filtru, může být jedním z důležitých ukazatelů změny povahy titanového sorbentu ve filtru. Objem nově tvořené oxidické fáze vzniká částečně na úkor objemu Ti fáze a částečně na úkor objemu pórů. Celková porozita je tvorbou oxidů snížena pouze nepatrně. Mezi jednotlivými zrny filtru jsou díky jejich členitosti velké mezery a jejich celkový objem je podstatně větší než suma objemu pórů uvnitř zrn. Díky příznivějším podmínkám pro krystalizaci dochází s vyšší intenzitou k zarůstání pórů a štěrbin uvnitř zrn oxidickými fázemi a progresivnějšímu snižování porozity uvnitř zrn. Z modelového výpočtu pro rutil vyplývá, že 56 % objemu tohoto oxidu vznikne na úkor objemu Ti materiálu houby a 44 % objemu oxidu vyplní volné prostory pórů a štěrbin.



Obr. 1: a) Krystaly oxidů na povrchu zrna Ti houby, b) prahování celkové porozity v řezu

Závěr

Hodnocení stavu filtru SVO-1 po 15 kampaních ukázalo, že veškerý volný vnější i vnitřní povrch titanových zrn je pokrytý oxidickými fázemi. Oxidace Ti materiálu houbového filtru je přirozeným fyzikálně-chemickým procesem, který postupně přeměňuje titanovou fázi na termodynamicky stabilnější fáze v hydrotermálním prostředí média primárního okruhu. Převládajícím oxidem je rutil (TiO_2), doprovázený anatasem (TiO_2) a ilmenitem (FeTiO_3). Ilmenit vzniká za účasti Fe, rozpuštěného v primárním médiu. Ve filtru byly zjištěny částice pocházející z nosných částí palivového souboru s vysokým obsahem Zr. V analýzách se dále vyskytovaly záchyty dalších elementů, zastížené většinou v nízkých koncentracích a spíše ojediněle (Cr, Mn, Ni, Si, Al, Zn, P, V, Sn, B). Porovnáním historie analýz lze konstatovat, že nedošlo k významnému nárůstu záchytu žádného prvku filtrem oproti minulosti. Nárůst podílu oxidické fáze v objemu filtru se projevuje především ve snižování vnitřní porozity zrn. Vzhledem k velkým mezerám mezi jednotlivými zrny houbového filtru a malému podílu vnitřní porozity zrn na celkové porozitě filtru se objemový efekt fázových změn na celkové porozitě houbového filtru projevuje jen velmi málo. Systematické rozdíly v charakteristice vzorků z různých výškových úrovní filtru nebyly zaznamenány.

Literatura

- [1] Burda, J. (2008): *Analýza titanových zrn*. Technická zpráva, DITI 302/491, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [2] Burda, J. (2012): *Analýza titanových zrn – 2*. Technická zpráva, DITI 2302/121, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [3] Brabec, P., Fencl, J., Tomek, L. (2018): *Analýza titanových zrn – 3*. Technická zpráva, DITI 2302/598 Rev. 1, ÚJV Řež, a. s., Řež.

PROAKTIVNÍ PŘÍSTUP K ŘÍZENÍ „TECHNOLOGICKÉHO ZASTARÁVÁNÍ“

TECHNOLOGICAL OBSOLESCENCE PROGRAMME

Peter Bročko

ÚJV Řež, a. s., divize ENERGOPROJEKT Praha, Na Žertvách 2247/29, 180 00 Praha 8

Definice “Technologického zastarávání“

Zastarávání je definováno jako nefyzikální stárnutí, tj. proces zastarávání ve srovnání se současnými:

znalostmi,
normami a předpisy,
technologiemi (nedostatek náhradních dílů, podpory, dodavatelů).

Cíle programu “Technologického zastarávání“

Zkušenosti JE s dodavateli:

- již nepodporují záruční a servisní služby,
- ukončili výrobu náhradních dílů.
- v současné době je přibližně 20 % zařízení JE klasifikováno jako zastaralé v tom, že již není podporováno výrobcem původního zařízení.

Cíl programu proaktivního technologického zastarávání:

- poskytnout provozovateli JE praktický návod pro řízení technologického zastarávání,
- minimalizovat potřebu řešit problémy zastarávání v naléhavé situaci nebo „reaktivním“ přístupem,
- řídit dopad technologického zastarávání na dostupnost a spolehlivost zařízení, tj. zajistit včasnou identifikaci a vyřešení technologického zastarávání zařízení.

Požadavky SÚJB ohledně „Technologického zastarávání“

Bezpečnostní návod SÚJB JB-2.1, Řízení stárnutí zařízení jaderných elektráren (body 4.14 až 4.16):

- Bezpečnost JE by mohla být snížena, jestliže zastarávání SKK není dopředu rozpoznáno a nejsou včas realizována nápravná opatření dříve, než nastane s tím související snížení spolehlivosti a dostupnosti SKK.
- Řízení zastarávání je součástí obecného přístupu k zlepšení bezpečnosti jaderných elektráren pomocí prováděných zlepšení výkonnosti SKK a řízení bezpečnosti.

V rámci periodického hodnocení bezpečnosti JE se hodnotí, jestli je zaveden účinný program řízení zastarávání bezpečnostně významných SKK podle následujících bodů:

zahrnutí všech nezbytných organizačních jednotek – inženýring, údržba, provoz, management, dodavatelé,
zavedení programu řízení a vytvoření odpovídající řídicí dokumentace,
snížení spolehlivosti nebo zvýšení poruchovosti vlivem technologického zastarávání,
soulad efektivního programu řízení stárnutí podle IAEA SSG-48,
předpis pro identifikaci zastaralých SKK,

identifikace zastaralých nebo v blízké době zastaralých zařízení, příprava výměny, nebo jiné odpovídající nápravné opatření,
školení zaměstnanců zapojených do programu řízení zastarávání,
zapojení provozovatele JE do projektů sdílení informací v oblasti technologického zastarávání,
hodnocení účinnosti programu řízení zastarávání.

Předpis řízení technologického zastarávání

Předpis pro řízení technologického zastarávání by měl obsahovat:

- účel a konkrétní cíle,
- definice a zkratky,
- popis postupu,
- alternativy řešení zastaralých komponent,
- sledování výkonnosti,
- reference a související formuláře,
- odpovědnosti,
- přílohy podle potřeby.

„Lekce ponaučení“ (Lesson Learned) programu technologického zastarávání

- Účinnost programů technologického zastarávání závisí na zapojení a účasti různých organizačních složek JE.
- Neúplná nebo nesprávná data o zařízení / komponentě povedou k neznámému (nezjistitelnému) stanovení technologického zastarávání.
- Proces nebo značky používané k identifikaci stavu technologického zastarávání zařízení v informačních systémech JE by měly být srozumitelné pro všechny organizační složky/personál JE.
- Program technologického zastarávání je obvykle samostatný program nebo je začleňován do programu spolehlivosti zařízení.
- Osvědčenou praxí je průběžně sledovat a aktualizovat stav technologického zastarávání zařízení a pravidelně znovu stanovovat priority, aby se zajistilo, že dopad technologického zastarávání na spolehlivost zařízení bude minimalizován.
- Data JE z několika systémů, včetně správy materiálu, řízení údržby, krátkodobého a dlouhodobého zlepšování stavu zařízení (Plant Health) a seznamu hlavního zařízení (Master Equipment List) byly integrovány v průběhu prioritizace zařízení.
- Porovnání (benchmark) s ostatními elektrárnami pro určení, zda jsou procesy a programy používané na JE efektivní – dobrá praxe.
- Hodnocení ekvivalence (equivalency evaluations) vyvinuté a obdržené od dodavatelů a dalších JE a použité jako vstup pro tým odpovědný za zařízení (správa zařízení) významně snížilo požadované náklady na lidské zdroje JE pro technické hodnocení.

MEDZILABORATÓRNE POROVNÁVACIE TESTY SPT METÓDY PRE JEJ POUŽITIE PRI STANOVOVANÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLOV POUŽÍVANÝCH V JADROVEJ ENERGETIKE

THE ROUND ROBIN TEST OF THE SPT METHOD FOR ITS USE IN THE ASSESMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF POWER PLANTS MATERIALS

Marek Adamech ^{a)}, Jana Petzová ^{a)}, Radim Kopřiva ^{b)}, Zdeněk Fencel ^{b)} a Daniel Omacht ^{c)}

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

^{b)} UJV Řež, a. s., Hlavní 130, Řež 250 68 Husinec, Česká republika

^{c)} MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava, Česká republika

Abstrakt

Dlhodobá prevádzka jadrových elektrární môže viesť k zmenám vlastností štruktúrnych materiálov. Na zachovanie bezpečnej a spoľahlivej prevádzky je preto nevyhnutné nepretržité monitorovanie a vyhodnocovanie týchto zmien. Vzorky pre štandardné mechanické testy majú relatívne veľké rozmery a častým problémom je ich dostupnosť vo veľmi obmedzenom množstve. Použitím metódy SPT je možné stanoviť mechanické vlastnosti z malého objemu získaného materiálu, čo má veľký význam aj z hľadiska zníženia radiačnej záťaže pri skúšaní ožiarených vzoriek. SPT metóda momentálne prechádza procesom štandardizácie CEN a ASTM. V tomto príspevku sú prezentované výsledky medzilaboratórneho porovnávania získané z troch odlišných laboratórií, ako aj posúdenie vplyvu rozdielnej geometrie skúšobného prípravku a testovacích parametrov.

Abstract

The long-term operation of power plants can cause changes in the properties of structural materials. To ensure the safe and reliable operation, it is necessary to monitor and evaluate these changes. Samples for standard mechanical tests are quite large and their availability is limited. The Small Punch Test (SPT) method can be used to evaluate the mechanical properties from a small volume of obtained material, which can reduce radiation exposure during testing of irradiated samples. This method is currently undergoing a standardization process both CEN and ASTM. This paper presents the results of the round-robin tests of the SPT method, carried out in the three different labs, on the materials from the power plant components. On the basis of the obtained results, the influence of the test matrix geometry and production accuracy was evaluated, as well as the defined test parameters.

Úvod

Stanovenie životnosti dôležitých komponentov jadrovoenergetických zariadení a ich potenciálne zlyhanie predstavujú kritický problém z hľadiska bezpečnosti a spoľahlivosti ich prevádzky. Počas štandardnej prevádzky JE sú komponenty vystavené viacerým typom degradačných mechanizmov. Preto je nevyhnutné neustále monitorovanie zmien ich materiálových vlastností. Vzorky pre štandardné testy využívané na stanovovanie mechanických vlastností majú zvyčajne veľké rozmery a častý problém predstavuje aj nedostatok originálneho materiálu pre monitorovacie programy. Ďalším problémom je ich vysoká aktivita. Z týchto dôvodov je žiaduce využívať nové inovatívne metódy testovania, ktoré vedú k redukcii veľkosti vzoriek.

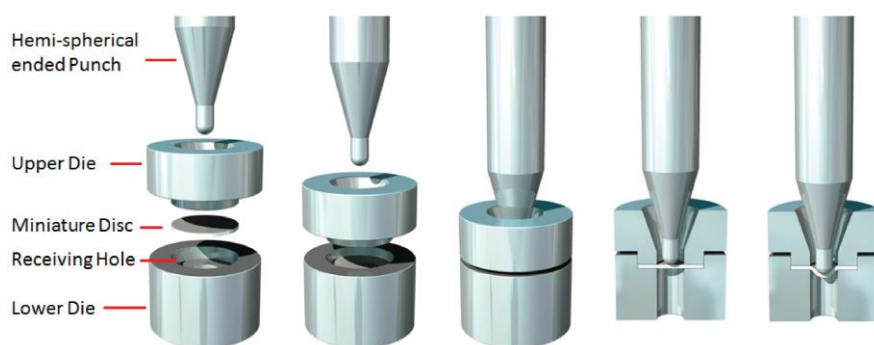
Medzi takéto metódy patrí aj skúška SPT. Napriek tomu, že táto metóda je v súčasnosti už široko využívaná, nebola doteraz prijatá konečná forma medzinárodnej normy. Norma CEN

[1], ktorá sa momentálne finalizuje obsahuje popis prístroja, metodiky, vzoriek, a takisto zahŕňa odporúčania na stanovenie ťahových a creepových vlastností. Jej schválenie, podobne ako normy ASTM [2], sa predpokladá ku koncu roku 2019.

Medzilaboratórne porovnávacie testy boli aj súčasťou schvaľovacích procesov vyššie spomenutých noriem, ktoré mali za úlohu odhaliť nepresnosti a rozdiely vo výsledkoch merania.

Metóda a materiály

Vo všeobecnosti je možné definovať SPT metódu ako experimentálnu techniku založenú na vtláčaní razníka s hemisférickým hrotom cez upnutú vzorku v tvare disku. Razník je vtláčaný do vzorky konštantnou rýchlosťou, pričom je zaznamenávaná sila potrebná na pohyb razníka, a to buď ako funkcia posunutia (hrotu razníka) alebo deflexie vzorky (meraná na spodnej strane vzorky, oproti kontaktnému bodu medzi razníkom a vzorkou) [3].



Obr. 1: Schematické znázornenie SPT metódy [4]

Použitím relatívne jednoduchého systému záznamu hodnôt sily a deflexie je možné zaznamenať nasledujúce základné mechanické vlastnosti:

- medzu klzu a medzu pevnosti, ktoré veľmi dobre korelujú s parametrami F_e a F_m ,
- prechodovú teplotu (DBTT), vypočítanú z hodnôt energie, ktoré sa získavajú z plochy pod krivkou sila-deflexia.

Pre tieto porovnávacie skúšky boli použité SPT vzorky s priemerom 8 mm a hrúbkou 0,5 mm. Vzorky boli vyrobené pomocou elektroiskrového rezania a následného brúsenia a leštenia. Všetky použité testovacie parametre sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1: Parametre SPT skúšania

Vzorka	Veľkosť vzorky [mm]	$\varnothing 8 \pm 0,1$
	Hrúbka vzorky [mm]	$0,5 \pm 0,005$
Geometria	Hrot razníka [mm]	$\varnothing 2,5$
	Matrica [mm]	R 0,2
Testovacie podmienky	Teplota [°C]	23
	Uťahovací moment [Nm]	10
	Merané parametre	krivka sila – deflexia $F(u)$
	Rýchlosť pohybu [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,5
	Tuhosť stroja	overenie vplyvu na výsledky

Na porovnávacie skúšky boli použité dva rozdielne typy materiálov (tab. 2). Prvý bol referenčný materiál s garantovanými homogénnymi vlastnosťami ZR-003 (IfEP). Druhý materiál, typický pre jadrové elektrárne, bol zvarový kov z tlakovej nádoby reaktora z jadrovej elektrárne

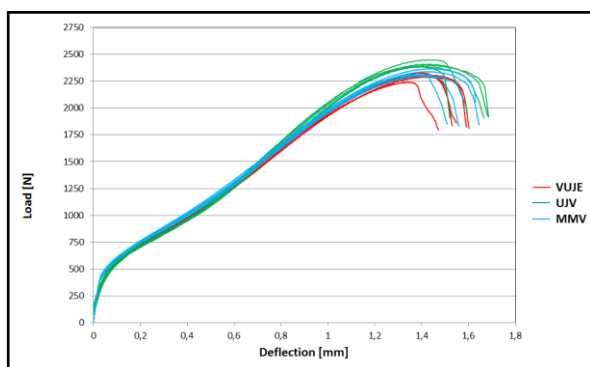
NORD8 (VVER-440/213), ktorý nikdy nebol v prevádzke. Táto nádoba bola vyrobená v Škoda Plzeň a jedná sa o Cr-Mo-V oceľ 15Ch2MFA a zvarový kov Sv10ChMFT.

Tab. 2: Chemické vlastnosti použitých materiálov

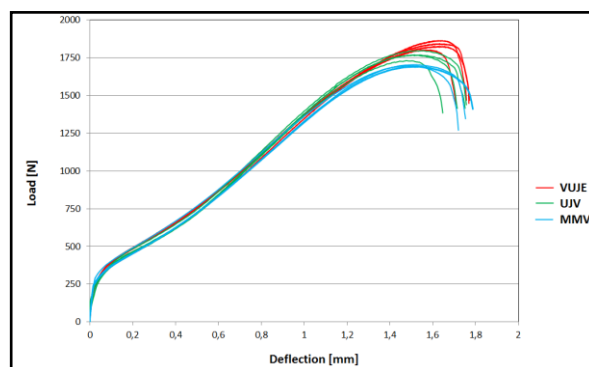
Materiál	Obsah prvkov [hm. %]										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Co
ZR-003	-	0,86 ±0,08	0,34 ±0,05	-	-	12,49 ±0,10	4,04 ±0,12	0,58 ±0,02	0,05 ±0,02	0,10 ±0,07	0,14 ±0,11
ZK NORD8 Sv10ChMFT / AN-42	0,053 ±0,005	0,97 ±0,01	0,40 ±0,02	0,007 ±0,001	0,013 ±0,001	1,37 ±0,02	-	0,50 ±0,01	0,16 ±0,01	0,081 ±0,005	<0,006

Výsledky a diskusia

Medzilaboratórneho testovania sa zúčastnili tri nezávisle laboratória – VUJE, a.s., ÚJV Řež, a. s. a MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. Všetky laboratória použili identické testovacie parametre (tab. 1) pre dve sady SPT vzoriek. Získané SPT krivky pre materiál ZR-003 sú zobrazené na obr. 2. Výsledky ukazujú veľmi dobrú zhodu reprodukovateľnosti, predovšetkým v oblasti hodnôt medze klzu. Rozdiel v maximálnej nameranej sily predstavuje ±55 N, čo je menej ako 2,5 %. Podobné výsledky boli dosiahnuté pre materiál ZK TNR, obr. 3.



Obr. 2: SPT krivky pre materiál ZR-003



Obr. 3: SPT krivky pre ZK TNR

Pre vyhodnotenie nameraných výsledkov bol použitý špeciálny softvér SPEVAL. Tento program spĺňa požiadavky vyhodnocovania podľa pripravovanej normy prEn15627 [1] a umožňuje čítať dáta z rozdielnych skúšobných zariadení.

Medza klzu je vypočítaná podľa nasledujúceho vzťahu

$$R_{p0.2} = \beta_{Rp0.2} \frac{F_e}{h_0^2}, \quad (1)$$

kde F_e je sila na medzi klzu, h_0 hrúbka vzorky a $\beta_{Rp0.2}$ je empiricky získaný korelačný koeficient definovaný v norme na hodnotu 0,510.

Pri stanovovaní medze pevnosti R_m je najčastejšie používaný nasledovný vzťah:

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_m}{h_0 u_m}, \quad (2)$$

kde F_m zodpovedá maximálnej sile, u_m deflexii a hodnota koeficientu β_{Rm} , ktorá musí byť stanovená experimentálne (v tomto prípade bola použitá hodnota z normy 0,278).

Získané výsledky sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3: Výsledky ťahových vlastností SPT vzoriek v porovnaní so štandardným testom

materiál	ZR-003				ZK NORD8			
lab	standard test	SPT	standard test	SPT	standard test	SPT	standard test	SPT
	R _m [MPa]		R _{p0.2} [MPa]		R _m [MPa]		R _{p0.2} [MPa]	
VUJE	926	920	765	713	590	629	473	472
UJV		930		801		635		541
MMV		938		690		626		495

Záver

Tento príspevok sumarizuje výsledky z medzilaboratórneho porovnávania 3 laboratórií (VUJE-UJV-MMV). Testy boli zamerané na určenie ťahových vlastností materiálov použitím SPT metódy a na overenia presnosti a opakovateľnosti výsledkov použitím pripravovaných noriem CEN a ASTM. Výsledky prezentované vyššie môžu byť zhrnuté do nasledujúcich bodov:

- SPT metóda môže byť veľmi užitočná pri stanovovaní základných mechanických vlastností, predovšetkým v situáciách s nedostatkom experimentálneho materiálu,
- výsledky ukazujú dobrú zhodu v nameraných hodnotách medzi metódou SPT a štandardným testom pre oba hodnotené materiály,
- nové aktuálne schvaľované normy (CEN a ASTM) zahrňujú definície testovacieho zariadenia a metodiky zaobchádzania s SPT vzorkami, dovoľujú však určitú mieru modifikácie testovacích parametrov, ktoré môžu spôsobiť väčší rozptyl nameraných dát,
- výsledky z medzilaboratórneho porovnávania ukazujú, že použitím prísne rovnakých testovacích kritérií dochádza k lepšej presnosti získaných výsledkov.

Literatúra

- [1] ECS (2007): *Small punch test method for metallic materials*. European Committee for Standardization, CEN Workshop Agreement, CWA 15627:2007 E.
- [2] ASTM (2018): *New practice for Small Punch test method for metallic materials*. On <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK61832.htm> (dostupné 27. marca 2018)
- [3] Bruchhausen, M., Altstadt, E., Austin, T., Dymacek, P., Holmström, S., Jeffs, S., Lacalle, R., Lancaster, R., Matocha, K., Petzova, J. (2018): European standard on small punch testing of metallic materials. *Proceedings of 5th International Small Sample Test Techniques Conference SSTT2018*, Swansea University, Swansea (Wales, UK) pp.1-14.
- [4] Lancaster, R., Davies, G., Illsley, H., Jeffs, S., Baxter, G. (2016): *Structural integrity of an electron beam melted titanium alloy*. Materials, Vol. 9, No. 6, paper E470. doi: 10.3390/ma9060470

HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ V ELEKTRÁRNÁCH

ASSESSMENT OF COMPONENTS SERVICE LIFE IN POWER INDUSTRY

Milan Holický

České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav

Abstrakt

Uvedené operativní postupy hodnocení životnosti energetických zařízení navazují na nový evropský dokument pro hodnocení existujících konstrukcí, který vychází z mezinárodní normy ISO, na evropské předpisy CEN i na další mezinárodní dokumenty. Příspěvek zahrnuje pokyny pro hodnocení životnosti všech druhů zařízení vystavené libovolnému zatížení a příklady stanovení zbytkové životnosti zařízení v elektrárnách.

Abstract

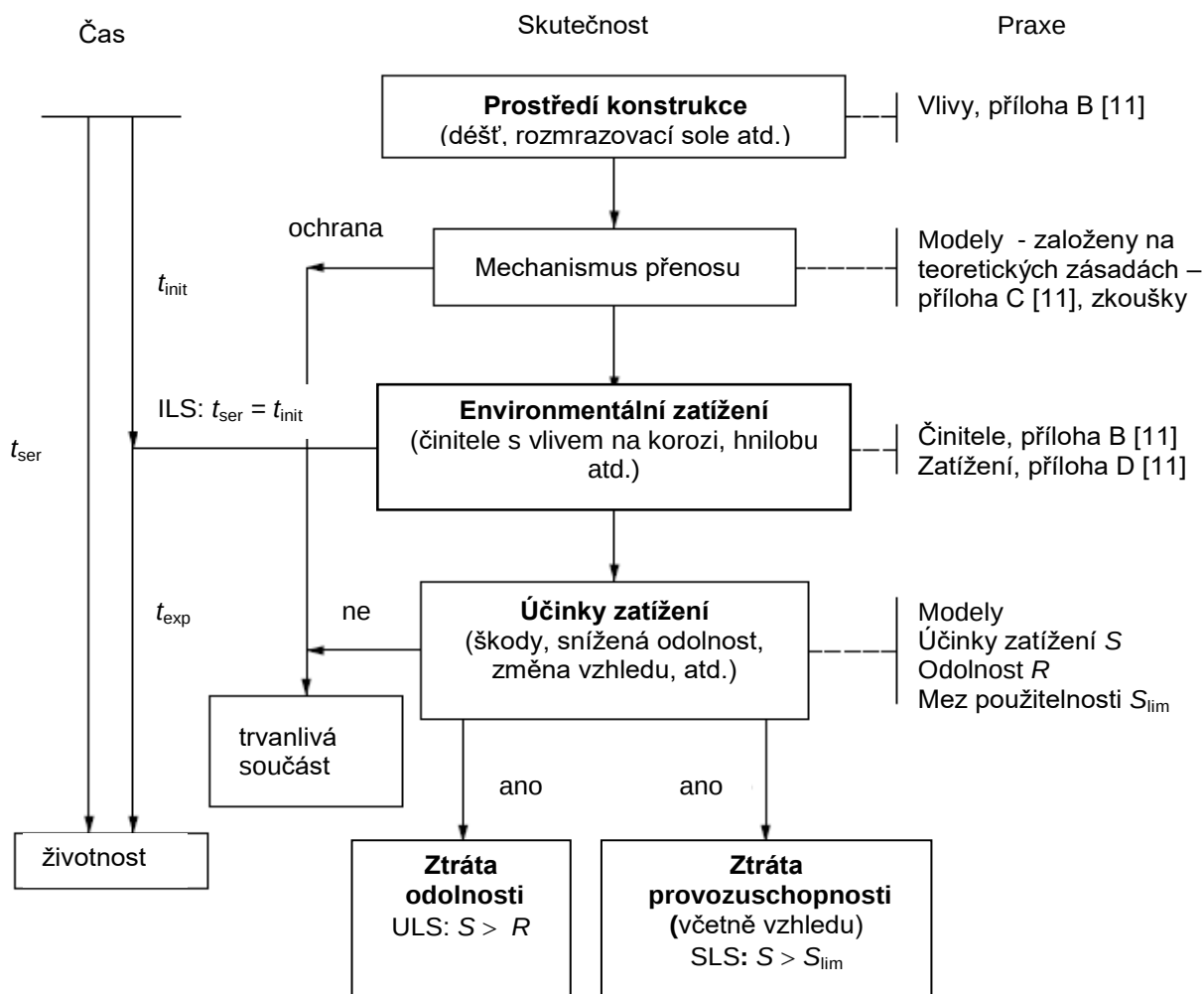
Presented operational rules for assessment of components service life are closely linked to International Standards ISO, to new European document CEN on assessment of existing structures and to further international documents. The contribution covers instructions for assessment of all kinds of components exposed to arbitrary actions and examples of assessing remaining working life of components in power industry.

Úvod

Při hodnocení životnosti nových i existujících energetických zařízení v elektrárnách se uplatňují pravděpodobnostní metody, které jsou podkladem nových dokumentů ISO i CEN. Mezinárodní organizace pro standardizaci ISO vydala nedávno dvě nové normy pro hodnocení existujících konstrukcí (popsané v publikaci [1]) a navrhování konstrukcí na trvanlivost [2], které se opírají o pravděpodobnostní postupy. Vycházejí dále z obecných požadavků dokumentů Fib [3] a [4], i z dokumentů mezinárodních organizací CEB a RILEM. Doplnující pokyny pro existující konstrukce poskytují dokumenty ISO zavedené v normách ČSN ISO 13823 a v ČSN ISO 13822. Ověřování životnosti uplatňuje různé pravděpodobnostní postupy včetně analýzy rizik [1], které umožňují přihlížet k nejistotám základních veličin a k následkům nepříznivého stavu zařízení (snížení funkční způsobilosti nebo v krajním případě poruchy). Stanovená úroveň spolehlivosti zařízení (pravděpodobnost P_f nebo index spolehlivosti β) se porovná s požadovanou (optimální nebo směrnou) úrovní spolehlivosti. Ve specifických případech se může uplatnit i funkční (morální) hledisko stanovení životnosti, které se opírá o ekonomickou optimalizaci efektivnosti zařízení.

Definice pojmu životnost

Životnost (doba funkční způsobilosti) t_{ser} jakéhokoli zařízení (konstrukce) energetických systémů je obecně závislá na odolnosti zařízení $R(t)$ a vnějších vlivech (zatížení) $S(t)$. Obě souhrnné veličiny $R(t)$ a $S(t)$ jsou zpravidla náhodné veličiny závislé na čase t . Se zřetelem na náhodné vlastnosti veličin $R(t)$ a $S(t)$ je nezbytné při definici životnosti t_{ser} stanovit pravděpodobnost oslabení nebo porušení funkční způsobilosti zařízení. Zjednodušeně se vymezují mezní stavy "použitelnosti" (serviceability limit states SMS) a extrémní mezní stavy "poruchy" (ultimate limit states ULS). V některých případech je účelné uvažovat také „iniciační“ mezní stav (initiation limit state ILS), který je ohraničen časem t_{init} , např. pro stanovení počátku procesu degradace (koroze) zařízení. Následující doba expozice t_{exp} po iniciaci degradace určuje celkovou dobu životnosti t_{ser} . Schematické znázornění takto formulované definice pojmu životnost je zachyceno na obr. 1.



Obr. 1: Definice pojmu životnost (ČSN ISO 13823)

Pravděpodobnostní aspekty

Při ověřování životnosti zařízení (konstrukce) je nezbytné přihlížet k pravděpodobnosti dosažení příslušných mezních stavů, jak naznačuje obr. 2 (publikace [1] a [2]). Pravděpodobnostní podmínku dosažení mezního stavu v čase t lze zapsat ve tvaru

$$P_f(t) = P\{R(t) - S(t) < 0\} < P_{tar} \quad (1)$$

kde $R(t)$ označuje odolnost zařízení a $S(t)$ účinky vnějších vlivů (zatížení), $P_f(t)$ označuje pravděpodobnost jevu, že vnější vlivy $S(t)$ překročily odolnost $R(t)$, P_{tar} označuje směrnou hodnotu pravděpodobnosti (target probability).

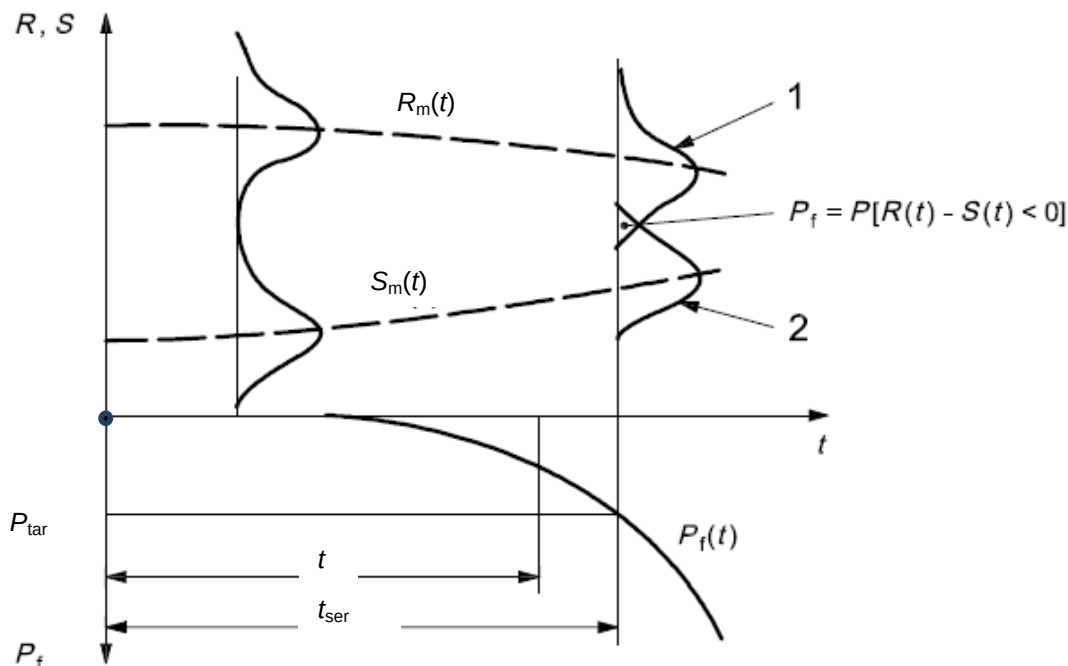
Pro stanovenou hodnotu směrné pravděpodobnosti P_{tar} lze na základě rovnice (1) určit životnost t_{ser} nebo t_{init} . Pokud rozhodují mezní stavy použitelnosti (SLS) uplatňují se zpravidla vyšší směrné pravděpodobnosti 0,05 nebo 0,01, pokud rozhodují mezní stavy poruchy (ULS) pravděpodobnosti 0,01 nebo 0,001. Při stanovení počátku procesu degradace t_{init} se uvažují větší pravděpodobnosti 0,2, 0,5. Predikce životnosti $t_{ser,p}$ pak vyplývá z rovnice

$$P_f(t_{ser,p}) = P\{R(t_{ser,p}) - S(t_{ser,p}) < 0\} = P_{tar} \quad (2)$$

Vypočtená pravděpodobnost poruchy $P_f(t)$ nebo index spolehlivosti $\beta = -\Phi^{-1}(P_f(t))$, kde symbol Φ označuje distribuční funkci normálního rozdělení, se porovnává s doporučenou směrnou hodnotou pravděpodobnosti P_{tar} , popř. β_{tar} . Při návrhu se ověřuje nerovnost

$$P_f(t) < P_{tar}, \text{ popř. } \beta > \beta_{tar} \quad (3)$$

Pravděpodobnosti poruchy lze stanovit různými způsoby, např. metodou FORM nebo přímou integrací, zpravidla s využitím různých softwarových produktů.



Obr. 2: Časová závislost rozdělení $R(t)$ (1) a zatížení $S(t)$ (2)

Zatížení

V ČSN ISO 13823 jsou uvedeny pokyny pro zatížení a vlivy vnějšího prostředí, které mají vliv na trvanlivost zařízení a mohou působit vně nebo uvnitř konstrukce nebo na její části. Zatížení vlivem vnějšího prostředí způsobuje degradaci nebo deformace materiálů. Mezi tato zatížení patří koroze, smršťování a další vlivy. Příklady zatížení jsou uvedeny v ČSN ISO 13823. Zatížení vlivem vnějšího prostředí lze v obvyklých případech klasifikovat jako zatížení proměnné, pro které je možno stanovit charakteristické a další reprezentativní hodnoty zatížení podle ČSN EN 1990. Charakteristické hodnoty základních veličin a dílčí součinitele lze aktualizovat na základě nově dostupných informací.

Životnost železobetonové konstrukce

Životnost chladicích věží závisí často na karbonataci betonu. Iniciační mezní stav ILS je zde definován jako jednoduchý požadavek, že časově závislá hloubka karbonatace $S(t)$ (účinek zatížení) je menší než tloušťka krycí vrstva betonu, zde označená jako odolnost R . Pravděpodobnost dosažení mezního stavu ILS kdy $S(t) > R$ se stanoví na základě vztahu

$$P_f(t) = P\{S(t) > R\} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_S(x, t) \Phi_R(x) dx \quad (4)$$

kde $\varphi_S(x,t)$ označuje hustotu pravděpodobnosti účinku zatížení $S(t)$ a $\Phi_R(x)$ distribuční funkci odolnosti R , x označuje a obecný bod hloubky betonu.

Z velkého počtu měření hloubky karbonatce $S(t)$ na chladicích věžích několika tepelných elektráren pro nechráněný povrch betonu se stanovily následující vztahy pro průměr $\mu_S(t)$, variační koeficient $V_S(t)$ a šikmost $\alpha_S(t)$, kde

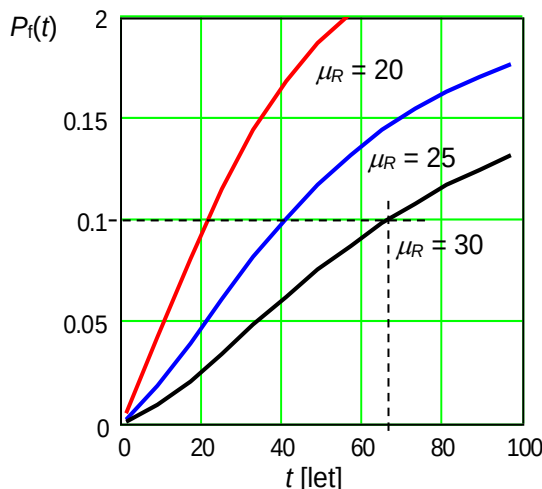
$$\mu_S(t) = 5 t \times 0,2 \text{ mm}, V_S(t) = 0,1 t \times 0,2, \alpha_S(t) = 0,2 t \times 0,2 \quad (5)$$

kde t je čas v letech. Nejvhodnějším teoretickým modelem je stanoveno rozdělení Gama. Pro tloušťku krycí vrstvy bez závislosti na čase se stanovily následující parametry

$$\mu_R = 20, 25 \text{ a } 30 \text{ mm}, V_R = 0,35, \alpha_R = 0,35 \quad (6)$$

Nejvhodnějším modelem krycí vrstvy je zde beta rozdělení s dolní mezí v nule. V příloze A normy ČSN ISO 13823 se pro obě základní veličiny $S(t)$ a R uvádí normální rozdělení, které však představuje pouze počáteční (apriorní) typ rozdělení, které je třeba zpřesnit (aktualizovat) na základě dostupných informací.

Pro výše uvedené teoretické modely a jejich parametry, dané ve vztazích (5) a (6), pravděpodobnost poruchy $P_f(t)$ podle vztahu (4) je zachycena na obr. 3. Graf na obr. 3 lze použít pro predikci životnosti $t_{ser,P} = t_{init}$ na základě směrné pravděpodobnosti P_{tar} a průměrné hodnoty krycí vrstvy μ_R . Pokud je například směrná hodnota $P_{tar} = 0,10$, pak průměr $\mu_R = 20$ mm odpovídá $t_{ser,P} \sim 23$ let, pro $\mu_R = 30$ mm odpovídá $t_{ser,P} \sim 65$ let (obr. 3). Predikce životnosti však významně závisí na předpokládaných teoretických modelech přijatých pro odolnost R a zatížení $S(t)$ a na stanovené směrné hodnotě pravděpodobnosti P_{tar} .



Obr. 3: Pravděpodobnost $P_f(t)$ pro parametry podle vztahů (5) a (6)

Životnost ocelového prvku

Příklad hodnocení zbytkové životnosti ocelových prvků (desek rychlozávěřů vodních elektráren nebo výztuže železobetonových konstrukcí) se opírá o zjednodušený model koroze oceli [8]. Pro stanovení pravděpodobnosti poruchy $P_f(t)$ a odpovídajícího indexu spolehlivosti β se uplatní vhodné pravděpodobnostní metody řady základních veličin. Hloubku koroze $d_{corr}(t)$ v čase t lze odhadnout na základě vztahu

$$d_{corr}(t) = A t^B \quad (7)$$

kde A a B jsou parametry výpočetního modelu, pro které se uvádějí hodnoty: pro parametr A rozmezí od 0,03 až 0,13, pro parametr B hodnoty v úzkém intervalu 0,6 do 0,7. Pro nerovnoměrnou důlkovou korozi platí přibližně

$$A = 0,06 \text{ mm a } B = 0,7 \quad (8)$$

Předpokládá se zde, že u oceli stáří 50 let postupně dochází k rozvoji důlkové koroze s průměrným úbytkem materiálu z jedné strany do 1 mm a asi s pravděpodobností 30% lokálního oslabení prvku z opačné strany. Model (7) s parametry (8) vede po padesáti letech k průměrné hloubce koroze 1,3 mm.

Funkce mezního stavu je vyjádřena rozdílem časově závislé odolnosti $M_R(t)$ (uvažuje se odolnost železobetonové desky) a ohybového momentu M_E od účinků zatížení tlakem q :

$$M_R(t) - M_E = \xi_R b (d - 1,33 d_{\text{corr}}(t))^2 f_y / 4 - \delta q L^2 / 12 \quad (9)$$

Tab. 1 uvádí teoretické modely všech základních veličin. Mez kluzu oceli f_y , tloušťka desky d , parametr koroze A a zatížení od vodního tlaku q se uvažují jako náhodné veličiny s normálním (N) nebo lognormálním (LN) rozdělením. Rozpětí desky L , šířka desky b , parametr koroze B a dynamický součinitel δ se považují za nenáhodné (deterministické) veličiny (DET). Ve funkci mezního stavu (9) se také uvažuje nejistota zjednodušeného modelu odolnosti prostřednictvím veličiny ξ_R .

Tab 1: Teoretické modely základních veličin

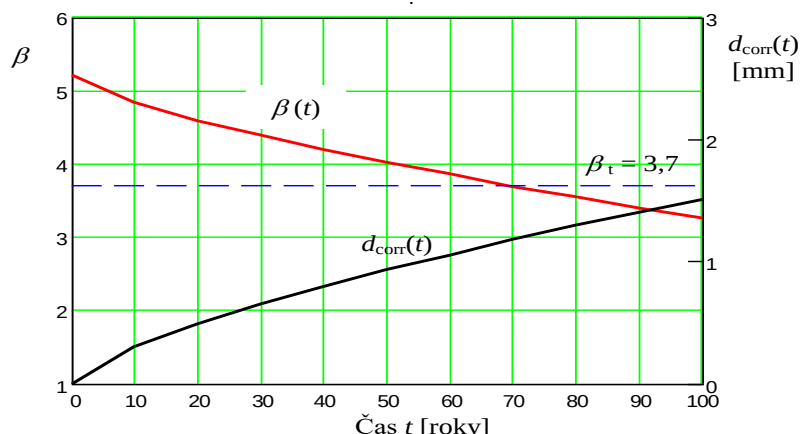
Základní veličiny	Symbol	Rozdělení	Jednotka	Charakteristická hodnota	Průměr	Variační koeficient
Mez kluzu	f_y	LN	MPa	235	280	0,08
Rozpětí krycí desky	L	DET	m	0,75	0,75	-
Tloušťka krycí desky	d	N	mm	18	18	0,03
Šířka krycí desky	b	DET	m	1	1	-
Parametr koroze	A	N	mm	-	0,06	0,10
Parametr koroze	B	DET	-	-	0,7	-
Zatížení od tlaku vody	q	N	kN/m ²	157,6	157,6	0,10
Dynamický součinitel	δ	DET	-	1,3	1,3	-
Nejistota odolnosti	ξ_R	DET	-	0,85	0,85	-

Obr. 4 ukazuje klesající index spolehlivosti $\beta(t)$ a vzrůstající korozní úbytky $d_{\text{corr}}(t)$ z jedné strany tabule v závislosti na čase t . V obr. 4 je rovněž vyznačena směrná hodnota indexu spolehlivosti $\beta_{\text{tar}}(80) = \beta_{\text{tar}} = 3,7$ pro požadovanou zbytkovou životnost 80 let, která je stanovena na základě požadované hodnoty indexu pro jeden rok $\beta(1) = 4,7$ ze vztahu:

$$\Phi(\beta(80)) = (\Phi(\beta(1)))^{80} = (\Phi(4,7))^{80} = \Phi(3,7) \quad (10)$$

$\Phi(\beta(80)) = (\Phi(\beta(1)))^{80} = (\Phi(4,7))^{80} = \Phi(3,7)$ Vztah (10) platí za předpokladu, že pravděpodobnosti vzniku poruch konstrukce v jednotlivých letech jsou vzájemně nezávislé.

Pravděpodobnost překročení mezního stavu a odpovídající hodnoty indexu spolehlivosti $\beta(t)$ sledované ocelové desky jsou stanoveny na základě funkce mezního stavu (9) s využitím komerčně dostupného softwarového produktu COMREL a vlastního programu vytvořeném v prostředí matematického softwaru MATHCAD.



Obr. 4: Index spolehlivosti $\beta(t)$ a hloubka koroze $d_{\text{corr}}(t)$ [mm] v závislosti na čase t

Z obr. 4 je patrné, že celková životnost tabulí, při které index spolehlivosti $\beta(t)$ klesne na hodnotu 3,7, je přibližně 70 let, zbytková životnost do dosažení této meze indexu spolehlivosti je tedy asi 20 let.

Závěrečné poznámky

Životnost zařízení t_{ser} je obecně závislá na odolnosti $R(t)$ a zatížení $S(t)$, což jsou náhodné veličiny závislé na čase t . S ohledem na náhodné vlastnosti veličin $R(t)$ a $S(t)$ je životnost zařízení t_{ser} definována na základě přiměřeného mezního stavu a směrné pravděpodobnosti P_{tar} . Ve specifických případech se také přihlíží k funkční (morální) způsobilosti zařízení.

Poděkování

This work was supported by the Ministry of Culture of the Czech Republic under Grant DG16P02M050 “Optimisation of Observations and Assessment of Heritage Structures”.

Literatura

- [1] Holický, M. (2019): *Hodnocení existujících konstrukcí*. České vysoké učení technické v Praze, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha. ISBN 978-80-01-06523-5
- [2] Holický, M., Marková, J. (2007): *Zásady navrhování stavebních konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1990*. Informační centrum ČKAIT, s.r.o., Praha. ISBN 978-80-87093-27-6
- [3] fib (2006): *Model Code for service life design*. fib Bulletin No. 34, fib, Lausanne. ISBN 978-2-88394-074-1
- [4] fib (2012): *Model Code 2010 – Final draft, Volume 1 and Volume 2*. Bulletin No. 65 and No. 66, fib, Lausanne. ISBN 978-2-88394-105-2, ISBN 978-2-88394-106-9
- [5] Kühn, B., Lukić, M., Nussbaumer, A., Günther, H.-P., Helmerich, R., Herion, S., Kolstein, M.H., Walbridge, S., Androic, B., Dijkstra, O., Bucak Ö. (2008): *Assessment of existing steel structures: Recommendations for estimation of remaining fatigue life*. JRC Scientific and Technical Reports, European Communities, Luxembourg. ISSN 1018-5593
- [6] Holický, M. (2007): Probabilistic design of structures for durability. *Proceedings of European Safety and Reliability Conference Esrel*.
- [7] CEB (1997): *New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion*. Bulletin d'information / Comité Euro-International du Béton, 238, Lausanne.
- [8] Holický, M., Marková, J., Sedláček, K. (2010): Pravděpodobnostní hodnocení životnosti energetických zařízení. *Sborník 6. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní.

HODNOCENÍ RIZIKA ULOŽENÍ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ

RISK ASSESSMENT OF PIPING SUPPORT SYSTEMS

Jiří Valášek ^{a)}, Lukáš Junek ^{a)}, Jiří Lukáš ^{b)} a Radovan Šťastný ^{b)}

^{a)} Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o.

^{b)} ČEZ, a. s., TKaD KE

Abstrakt

Předkládaný článek se věnuje stručnému popisu metodiky hodnocení rizika uložení potrubních systémů. Pod pojmem uložení jsou myšleny veškeré prvky, které vymezují potrubní systém v prostoru. Rizikové hodnocení uložení bylo vytvořeno za účelem posouzení rizikovosti jednotlivých komponent uložení (závěsy, podpěry, tlumiče atd.) a ohodnocení jejich aktuálního technického stavu. Metodika je nastavena tak, že pro hodnocení rizika uložení potrubního systému je potřeba vytvořit / získat souhrn informací, které se týkají provedení uložení, technického stavu uložení a potenciálních dopadů poškození uložení potrubního systému. Každá získaná informace je poté v rámci hodnotícího procesu ohodnocena patřičným rizikovým skóre, ze kterého jsou následně vypočteny indexy použité při výsledném hodnocení rizika a technického stavu uložení. Podle úrovně výsledného rizika jsou následně definována opatření pro snížení rizika jednotlivých komponent uložení. Cílem hodnocení je snaha docílit stavu, kdy bude znám technický stav každé komponenty uložení na daném potrubním systému a také, aby jednotlivé komponenty uložení nepředstavovaly pro bezpečný provoz potrubního systému výrazné riziko.

Abstract

The presented article deals with a brief description of the methodology of pipeline support risk assessment. The term pipeline support means all elements that define the pipeline system in a power plant area. The risk assessment of the pipeline support was created to assess the risk of individual support components (hangers, supports, shock absorbers, etc.) and to assess their current technical condition. Idea of methodology is that it is necessary to create and to obtain a summary of information about of the pipeline support design, the pipeline support technical condition and the potential impacts of pipeline support damage. Each information obtained due to survey is then evaluated by the appropriate risk score, from which the evaluation indexes are calculated. The evaluation indexes are then used for risk and risk matrix expression. When the risks and risk matrix of pipeline support are evaluated, appropriate steps are designed in order to reduce the risk of each pipeline support component. The aim of the methodology (survey process) is to achieve a state when the technical condition of each pipeline support component on a given pipeline system is known and also that none of individual pipeline support component do not pose a significant risk to the safe operation of the pipeline system.

Úvod

Metodika hodnocení rizika uložení potrubního systému byla vyvinuta na pracovišti Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o. na základě diskuzí s pracovníky ČEZ, a. s. odboru Technická kontrola a diagnostika Klasických elektráren (TKaD KE), s využitím literatury, která se dané problematice věnuje [1, 2] a již vypracovaných metodik zaměřených na hodnocení rizika, vytvořených na pracovišti Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o. [3, 4, 5]. Metodika pro hodnocení rizika poskytuje návod pro hodnocení uložení u libovolného potrubního systému, ovšem její hlavní využití se předpokládá u uložení parovodů klasických elektráren. Pod pojmem uložení rozumíme jednotlivé komponenty, které zabezpečují ustavení potrubního systému v prostoru elektrárny a které jsou pro daný potrubní systém voleny tak, aby vhodným způsobem

kompensovaly jeho váhu a deformace vzniklé při provozu potrubního systému. Jedná se především o pevné nebo pružinové závěsy, pevné nebo pružinové podpěry, kluzné podpěry a vedení, pevné body a tlumiče. Komponenta (prvek) uložení se zpravidla skládá ze tří základních dílů:

1. část, která bezprostředně obklopuje potrubí (např. objímky, třmeny),
2. vlastní nosná část (např. táhla, stojany),
3. část, která přenáší zatížení na stavební konstrukci nebo zajišťuje předem definovaný pohyb (např. stropní uchycení, kluzné podložky).

Vytvořenou metodiku je možno využít jako návod, na jaké projevy poškození je potřeba se v rámci kontroly uložení zaměřit bez návaznosti na hodnocení rizika uložení, nebo získané informace o technickém stavu uložení dále zpracovat a stanovit výsledná rizika uložení. Na základě stanovených rizik pak definovat nutná opatření pro snížení rizika tak, aby bylo zajištěno, že u všech posuzovaných komponent uložení bude dosaženo nejnižší možné míry rizika selhání jejich funkčnosti. Cílem hodnocení rizika uložení je také zajistit včasné a dostatečné informace o uložení a přijetí opatření pro zajištění bezpečného a ekonomického provozu potrubního systému.

Princip hodnocení rizika uložení

Výchozím vstupem pro metodiku jsou sestavené seznamy komponent uložení, které se na hodnoceném potrubním systému nacházejí. Pro jednotlivé komponenty uložení a jejich blízké okolí je potřeba shromáždit potřebné informace (hodnotící otázky) o jejich aktuálním technickém stavu, respektive o jejich poškození. Vybrané informace, které je potřeba z hlediska hodnocení rizika uložení shromažďovat, se týkají také potrubního systému, na kterém je hodnocení uložení prováděno. Hodnocení rizika uložení probíhá tak, že každé informaci (hodnocené otázce) je přiřazeno patřičné rizikové skóre podle předem definovaných kritérií. Každá informace je tedy ohodnocena patřičným rizikovým skóre podle toho, jaký je aktuální stav konkrétního prvku uložení. Pod pojmem rizikové skóre je myšleno celé číslo (počet bodů) od 1 do 5, přičemž 1 bod reprezentuje nejnižší rizikové skóre (nejmenší riziko) a 5 bodů naopak nejvyšší (největší riziko). Metodika hodnocení je vytvořena univerzálně pro různé druhy komponent uložení. Je tedy možné, že danou informaci nebude možné pro konkrétní komponentu uložení získat. V takovém případě otázka nevstupuje do hodnocení (například, když je hodnocen pevný závěs, tak jsou informace týkající se pružinového prvku označeny například číslem -1). Pokud nějaká informace není známa, nebo ji aktuálně nelze ověřit (kontroly již dříve proběhly, ale aktuálně to není možné) vzhledem k obtížnému přístupu (např. komponenta uložení je zcela nepřístupná během provozu, je zcela pod izolací, je na nedostupném místě během provozu, atd..) je daná informace ohodnocena následovně: rizikovým skóre 3 v případě, že daná informace byla získána při předchozích kontrolách a byla tehdy hodnocena body 1 nebo 3 a zároveň daná informace není starší 5 let, nebo rizikovým skóre 5 v případě, že daná informace ještě nebyla po dobu hodnocení získána nebo byla získána dříve, ale informace je starší 10 let. Toto „náhradní“ hodnocení bude pravděpodobně použito v případech vizuální kontroly uložení tam, kde je hodnocená komponenta uložení během provozu nepřístupná. V obou výše zmíněných případech je použití náhradního skóre potřeba uvést do poznámky hodnocení s dodatkem, že je potřeba danou komponentu uložení zkontrolovat během příští plánované odstávky (předpokládá se potřeba sundání tepelné izolace v místech komponenty uložení).

Souhrn informací, které je potřeba shromažďovat k jednotlivým komponentám uložení i k celé potrubní trase při periodickém hodnocení, je volen v tom duchu, aby bylo možné získat potřebné informace na základě vizuální kontroly.

Samotné hodnocení, respektive jednotlivé informace, které je potřeba shromažďovat, jsou rozděleny do několika tematických celků.

Informace o projektové dokumentaci potrubního systému (uložení, potrubí atd.)

Jedná se o získání vstupních údajů o hodnoceném potrubním systému. Dostupnost projektové dokumentace je v rámci hodnocení rizika uložení důležitá vzhledem k možnému srovnání, zda se hodnocené uložení nachází v projektovém stavu. Hodnocení informací týkajících se projektové dokumentace je provedeno pro daný potrubní systém, a to při zavedení hodnocení uložení do praxe.

Informace o přístupnosti jednotlivých komponent uložení

Hodnocení rizikovosti uložení z hlediska jeho přístupnosti / dostupnosti při vizuální kontrole. Hodnocení je provedeno pro jednotlivé prvky uložení při zavedení hodnocení uložení do praxe.

Informace o provozních parametrech a neprojektových provozních stavech

Hodnocení rizikovosti uložení na základě sledování provozních parametrů a případných neprojektových provozních stavů. V zásadě se hodnotí informace, zda je na potrubním systému prováděno měření provozních parametrů a zda tyto parametry nepřekračují projektové provozní parametry. Případný výskyt neprojektových provozních stavů je hodnocen zvlášť. Hodnocení informací v tomto bodě je prováděno periodicky.

Informace o poškození uložení

Informace o jednotlivých prvcích uložení jsou získávány vizuální kontrolou. Informace v tomto bodě jsou zaměřeny především na ohodnocení případného poškození konkrétních prvků uložení, které jsou na potrubí trase instalovány. Jedná se o závěsy, podpěry, pevné body, tlumiče. Hodnocení informací v tomto bodě je prováděno periodicky.

Informace o poškození potrubí

Informace o poškození potrubí jsou získávány vizuální kontrolou. Vizuální kontrola je v tomto bodě zaměřena především na kontrolu poškození tepelné izolace a jejího opláštění a také zda je potrubní trasa zjevně uložena na všech uloženích. Hodnocení informací v tomto bodě je prováděno periodicky.

Následky poškození uložení

Tato část metodiky je zaměřena na hodnocení následků poškození uložení. Hodnocení následků je zaměřeno především na ekonomickou stránku následků poškození uložení. Hodnocení je provedeno při zavedení hodnocení uložení do praxe.

Na základě shromážděných informací, z výše jmenovaných témat, a ohodnocení těchto informací rizikovým skóre, bude každé komponentě uložení možno přiřadit její rizikové hodnocení vyjádřené pomocí **Indexu potenciálu poškození** – I_{PP} [-]. Pro popis aktuálního technického stavu uložení je zaveden **Index technického stavu** – I_{TS} [-], který je vypočten z hodnocení informací, týkajících se pouze poškození uložení. Ohodnocením informací týkajících se následků poškození je vytvořen **Index následků poškození** – I_{NP} [-]. Z vypočtených indexů (Index potenciálu poškození a Index následků poškození) je vyjádřeno **Riziko poškození uložení** a **Matice rizika poškození a následků** (poškození vs. následky). Jednotlivé indexy jsou vypočteny tak, že každé informaci pro každou hodnocenou komponentu uložení je přiřazeno její rizikové skóre. Suma rizikových hodnocení je poté normována vůči nejhoršímu možnému hod-

nocení všech patřičných informací, což znamená, že výsledné vypočtené indexy jsou normované, tedy nabývají hodnot v intervalu $<0;1>$.

Dle úrovně výsledného rizika jsou následně definována nutná opatření pro snížení rizika tak, aby bylo zajištěno, že pro všechna posuzovaná uložení bude míra rizika minimalizována.

Obecný matematický popis stanovení indexů

Každou z hodnocených informací lze ohodnotit patřičným rizikovým skóre v rámci zvoleného intervalu hodnot 1 až k a následně všechny hodnocené informace porovnat s nejhorším možným stavem.

$$x; \forall x \in \{1, \dots, k\} \wedge y; y > 0 \quad (1)$$

kde x je hodnocení dané informace a y je váha hodnocené informace.

Vypočtení jednotlivých indexů (Indexu potenciálu poškození uložení – I_{PP} , Index technického stavu uložení – I_{TS} a Index následků poškození – I_{NP}) je provedeno podle vztahu (2).

$$I_{PP}, I_{TS}, I_{NP} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 \cdot y_i^2}} \quad (2)$$

kde x_i představuje hodnocení i -té informace, k_i představuje nejhorší možné hodnocení i -té informace a y_i představuje váhu i -té informace.

Výsledky hodnocení

Výsledky hodnocení je možné prezentovat pomocí jednotlivých indexů (Index potenciálu poškození, Index technického stavu uložení, Index následků poškození) formou rizik (Riziko poškození uložení, Matice rizika poškození a následků) nebo také pomocí vyjádření technického stavu uložení. Prezentace výsledků může být formou hodnot indexů (interval $<0;1>$), barvy (zelená, bílá, žlutá, červená, modrá), slovní (zanedbatelná, nízká, střední, vysoká, nehodnoceno/neznámí stav) a písmennou (A, B, C, D, E, X).

Index potenciálu poškození = Riziko poškození uložení

Vyjádření Rizika poškození uložení dle Indexu potenciálu poškození je uvedeno v tab. 1. Riziko a matice rizika jsou prezentovány slovně a barevně.

Tab. 1: Vyjádření Rizika poškození uložení dle Indexu potenciálu poškození

	Riziko poškození uložení - PRU			
	Zanedbatelné	Nízké	Střední	Vysoké
Index potenciálu poškození	$< 0,25$)	$<0,25 - 0,5$)	$<0,5 - 0,75$)	$<0,75 - 1$)

Index technického stavu uložení = Technický stav uložení

Technický stav uložení je vyhodnocen na základě Indexu technického stavu. Technický stav je prezentován písmennou formou a barevně. Vyjádření technického stavu uložení je uvedeno v tab. 2.

Tab. 2: Vyjádření technického stavu uložení

Technický stav uložení						
	A	B	C	D	E	X
Index technického stavu	< 0,30	<0,30 – 0,50)	<0,50 - 0,75)	<0,75 – 0,92)	<0,92 – 1)	-

Index potenciálu poškození a Index následků poškození = Matice rizika poškození a následků

Matice rizika poškození a následků je vytvořena na základě Indexu potenciálu poškození a Indexu následků poškození. Sestavení matice rizika poškození a následků je provedeno v tab. 3. Riziko a matice rizika jsou prezentovány slovně a barevně.

Tab. 3: Sestavení Matice rizika poškození a následků

Rizika poškození a následků - RPN					
Index potenciálu poškození	< 0,25	Zanedbatelné	Zanedbatelné	Nízké	Nízké
	<0,25 - 0,5)	Zanedbatelné	Nízké	Střední	Střední
	<0,5 - 0,75)	Nízké	Střední	Střední	Vysoká
	<0,75 – 1)	Nízké	Střední	Vysoké	Vysoké
Index následků poškození	< 0,25)	<0,25 - 0,5)	<0,5 - 0,75)	<0,75 – 1)	

Tab. 4: Návrh výsledného hodnocení uložení *

ID	Ele.	KKS	Popis komponenty uložení	I _{PP}	RPN	TS	Plánování
1	ETU II	B1LBA02BQ005	Jednotáhlový pevný závěs	0,88	N	E	Ihned
2	ETU II	A1LBA03BQ001	Dvoutáhlový pružinový závěs	0,82	S	D	Krátkodobé
3	ETU II	C2LBB01BQ014	Dvoutáhlový pružinový závěs s konstantní silou	0,48	S	C	Střednědobé
4	ETU II	D2LBC01BQ004	Patka pro svislé potrubí kluzná	0,23	N	A	Dlouhodobé

ID – pořadí, Ele. – elektrárna, KKS – jednoznačný kód pro označení komponenty, I_{PP} – Index potenciálu poškození, RPN (Rizika poškození a následků), TS – Technický stav uložení

* Pozn. k tabulce: uvedené výsledky slouží pouze pro příklad prezentace výsledků. Prezentované označení, popis komponenty uložení a hodnoty výsledků nejsou získány na základě provedení hodnocení reálných komponent uložení.

Uvedení číselných hodnot jednotlivých indexů je důležité pro představu o "poloze rizika" v příslušné matici rizika a dále k uvědomění si kvantitativních rozdílů mezi jednotlivými hodnocenými komponentami uložení. V rámci metodiky hodnocení rizika uložení je možno prezentovat jednotlivé výsledky (indexy, stav, rizika) různou formou (číselně, barevně, písmeně, slovně). Z důvodu rozumné orientace ve vypočtených výsledcích hodnocení rizika uložení je v tab. 4 představen návrh prezentace výsledků pro jednotlivé hodnocené komponenty uložení.

Závěr

Metodika hodnocení rizika uložení obsahuje popis rizikově orientovaného hodnocení uložení potrubních systémů. Rizikové hodnocení uložení bylo vytvořeno za účelem posouzení rizikovitosti jednotlivých komponent uložení (závěsy, podpěry, tlumiče atd.) a zjištění jejich aktuálního technického stavu. Největší riziko plynoucí pro potrubní systém z poškozeného uložení je, že v případě výrazného poškození / zničení určité komponenty uložení dochází k tomu, že je potrubní systém v jiném stavu, než v jakém byl projektován. Může tak dojít k přeskupení napětí do jiných částí potrubního systému, což ve svém důsledku může způsobit rychlejší čerpání životnosti dalších částí potrubního systému (ohroženy jsou především svary).

V rámci metodiky pro hodnocení rizika uložení potrubního systému byl vytvořen souhrn informací, které je potřeba za účelem rizikového hodnocení uložení shromažďovat. Jednotlivým informacím je poté přiřazeno jejich rizikové skóre, ze kterého jsou vypočteny indexy prezentující skutečný stav uložení potrubního systému. Na základě vypočtených indexů (Indexu potenciálu poškození – IPP [-], Indexu technického stavu – ITS [-], Indexu následků poškození – INP [-]) jsou stanovena patřičná rizika, respektive matice rizika pro každou hodnocenou komponentu uložení. Dle úrovně výsledného rizika jsou následně definována opatření pro snížení rizika jednotlivých komponent uložení. Cílem hodnocení je snaha docílit stavu, kdy bude znám technický stav každé komponenty uložení na daném potrubním systému a také, aby jednotlivé komponenty uložení nepředstavovaly pro bezpečný provoz potrubního systému výrazné riziko (výsledné riziko uložení nízké nebo žádné).

Literatura

- [1] EPRI (2012): *Piping Hanger System Inspection Guide*. Technical report, 1026659, EPRI, Palo Alto.
- [2] EPRI (2014): *Evaluation of Piping Systems After Traumatic Thermal and Mechanical Shock Events*. Technical report, 3002003015, EPRI, Palo Alto.
- [3] NTD A.S.I. (2016): *Zvláštní případy zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER: Obecná metodika komplexního hodnocení životnosti jaderných zařízení*. Normativně technická dokumentace, ZP – 08–2016, A.S.I.
- [4] Diviš, V. a kol. (2016): *Technická pomoc při optimalizaci metodiky RMSS ČEZ ME 0980, Optimalizovaná metodika RiskWeld pro hodnocení svarových spojů*. Výzkumná zpráva, ZP6012/16, Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Brno.
- [5] Diviš, V. a kol. (2017): *Metodika komplexního hodnocení životnosti PG EDU a ETE*. Výzkumná zpráva, ZP6195/17, Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Brno.

VYSOKORYCHLOSTNÍ TERMOGRAFICKÁ DIAGNOSTIKA ROTAČNÍCH DÍLŮ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

HIGH SPEED THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF ROTATING PARTS OF POWER EQUIPMENT

Michal Švantner ^{a)}, Jiří Tesař ^{a)} a Martin Buršík ^{b)}

^{a)} Západočeská univerzita v Plzni

^{b)} ČEZ, a. s.

Abstrakt

Rotační díly patří mezi kritické komponenty energetických zařízení. Termografická diagnostika může včas odhalit jejich poškození a zabránit vážným škodám. Taková diagnostika je zpravidla možná pouze při běhu zařízení. Komplikací bývá také špatná přístupnost a vysoké rychlosti rotace, které znemožňují použití standardních termografických kamer s bolometrickým detektorem. Příspěvek je zaměřen na vysokorychlostní termografickou diagnostiku rotoru generátoru elektrárny. Je ukázán způsob použití vysokorychlostní termografické kamery na bázi kvantových detektorů s rychlostí vzorkování 1 kHz. Výstupy termografického měření jsou porovnány s výstupy měření kvantových infračervených detektorů o rychlosti vzorkování až 30 kHz. Jsou prezentovány výsledky diagnostiky rotoru a ukázány možnosti odhalení indikací poškození. Výsledky jsou porovnány s použitím bolometrické kamery s HD rozlišením a je prezentován význam integrační doby pro vysokorychlostní termografická měření.

Abstract

Rotating parts belong to critical components of power devices. Thermographic diagnostics can predict their faults and prevent major failures. The diagnostics can be mostly performed only during an operation of the devices. A poor accessibility of the parts and their high speed of a rotation, which limits usability of standard bolometric infrared cameras, make such a diagnostics complicated. The contribution is focused on a thermographic diagnostics of a rotor of a power plant generator. A usage of a high-speed infrared camera, which is based on quantum detectors, with a frame-rate 1 kHz is presented. The thermographic measurements outputs are compared with high-speed infrared quantum detectors measurement results made with the sampling frequency 30 kHz. Results of the rotor diagnostics and possibilities of a detection of possible faults indications are introduced. The results are compared with a bolometric infrared camera with HD resolution results and a significance of an integration time for high-speed thermographic measurements is presented.

Úvod

Rotační zařízení v elektrárnách patří k velmi namáhaným dílům a případné poruchy spojené s poškozením rychle rotujících částí při běhu zařízení mohou vést ke značným škodám. Kritická závada se může iniciovat i z mikroskopického poškození, které je běžnými metodami složité odhalit. Termografická diagnostika je metoda inspekce, která využívá infračervené termografie [1]. Lze s ní detekovat skryté problémy, pokud dochází k jejich tepelnému projevu. Ten je přitom častou indikací rozvinutého ale i počínajícího poškození. Termografická diagnostika tak může významně přispět k prediktivnímu odhalování problémů ještě před závažnými poruchami v průběhu provozu zařízení. Nové přístupy (např. [2]) a technický vývoj v oblasti měřicích zařízení umožňuje její využití v širším spektru aplikací. V tomto příspěvku je představen postup termografické diagnostiky rotoru generátoru elektrárny. Je demonstrován zejména význam využití vysokorychlostního záznamu. Jsou představeny postupy a metody měření a příklad výsledků s indikacemi možných problémů.

Termografické měření rotoru generátoru

Cílem měření bylo zejména zhodnocení možností využití vysokorychlostní infra-červené (IR) kamery pro stanovení ohřevu rotoru během náběhu, kdy dochází k jeho největší zátěži. Byla použita chlazená vysokorychlostní kamera FLIR SC7650 se záznamem až 1 kHz. Pro porovnání bylo měření provedeno standardní termografickou kamerou InfraTec VarioCam HD.

Objektem měření byl rotor generátoru o průměru cca 10 m, jehož maximální rychlost otáčení byla 140 otáček za minutu. V oblasti měření byl povrch opatřen vysoko-emisivní barvou. Měření probíhalo při náběhu, který trval cca 40 s a kdy dochází k jeho největšímu elektrickému a mechanickému zatěžování. Měření probíhalo s frekvencí 1000 Hz, bylo zaznamenáno cca 120 000 vzorků.

Standardní teplota rotoru v měřeném místě se zvýšila z cca 40 °C na 60-80 °C. Při měření byly zjištěny anomálie teploty na 3 pólech, kde maximální teploty byly v rozmezí 118 až 180 °C. Maximální teplota odchylek je patrná v počátečních fázích rozběhu, tj. několik sekund po startu. Následně teplota již nestoupá, ale rozvádí se do okolí a tím i maximální teplota klesá. Diagnostiku je tedy nutné provádět pouze při rozběhu rotoru, při standardním chodu se indikace již nemusí objevit.

Shrnutí a závěr

Standardním termografickým měřením pomocí bolometrické kamery lze znamenat pouze „průměrnou“ teplotu oblasti po obvodu, protože záběr s dlouhou integrační dobou je rozmanitý. Hodnoty teplot jsou pak značně zkreslené a pro účely diagnostiky zařízení nepoužitelné. Měření je tedy nutné provést s krátkou integrační dobou cca desítky až stovky us a frekvencí snímkování alespoň 1 kHz. To umožňuje plnohodnotný kontinuální záznam pro detailní analýzu. Provedené experimenty ukázaly, že termografickým měřením lze zjistit anomálie teploty, které mohou indikovat problém v diagnostikovaném rotoru. V rámci provedených experimentů není možné vyhodnotit kritéria závažnosti indikací. Není tedy ani možné stanovit skutečnou příčinu výskytu indikací. Lze však stanovit potenciálně riziková místa pro analýzy dalšími metodami.

V místě anomálií byla sledována maximální teplota od 120 do cca 180 °C, tj. o více než 60 °C vyšší než v místech bez anomálií. Z důvodu nehomogenity povrchu se objevují další teplotní nehomogenity, anomálie v okolí šroubů jsou však při nastavení vhodného zobrazení kamery vzhledem k jejich velikosti zřetelně patrné. Před vlastním měřením byly provedeny kalibrační testy měřicího zařízení. Byla ověřena přesnost v rozsahu ± 1 °C nebo ± 1 %, která je uváděna výrobcem zařízení. Přesnost měření v provozních podmínkách ovlivňují další parametry (např. homogenita emisivity), nicméně lze předpokládat dostatečnou přesnost (cca ± 2 °C) pro hodnocení teplotních odchylek rotoru.

Poděkování

Práce vznikla za podpory projektu „LABIR-PAV / Předaplikační výzkum infračervených technologií“, reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0010018 financovaného z EFRR.

Literatura

- [1] Meola, C., ed. (2018): *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*. Bentham Science Publishers. ISBN 978-1-60805-521-0
- [2] Švantner, M., Skála, J., Muzika, L., Čížek, P. (2018): Thermographic detection of damage initiation of cyclically loaded parts. *Presentation on the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference QIRT 2018*, QIRT Council, Berlin.

PROBLEMATIKA MĚŘENÍ TEČENÍ PAROVODŮ

CREEP MEASUREMENT OF STEAM PIPING

Jan Patera, Pavel Zahrádka, Jan Matějček a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Vysokotlaké parovody za provozu podléhají degradaci vlivem tečení. Jedná se o trvalou deformaci způsobenou dlouhodobým zatěžováním vysokou teplotou a tlakem, která se v čase zvětšuje až do následného vzniku trhliny a havárie. Za účelem zlepšení současné metodiky pro kontrolu vytípaných namáhaných úseků vysokotlakých parovodů byly testovány pokročilé měřicí metody – 3D skenování a fotogrammetrie. Hlavními cíli je přechod z lokálního hodnocení tečení na plošné, stanovení velikosti deformace v po sobě jdoucích časových intervalech a identifikace lokálních deformací povrchu.

Abstract

High-pressure steam pipelines are subject to creep degradation during operation. It is a permanent deformation caused by long-term load of high temperature and pressure, which increases in time until a subsequent crack and accident occurs. In order to improve the current methodology for the control of selected stressed sections of high-pressure steam pipelines, advanced measuring methods – 3D scanning and photogrammetry – were tested. The main objectives are transition from local evaluation to surface evaluation, determination of deformation in successive time intervals and identification of local surface deformations.

Úvod

V současné době se průběh tečení se při odstávkách monitoruje pomocí mikrometru v několika místech parovodu. Měření mikrometry je ovšem omezeno pouze na několik měřicích míst, zúžené na 2 až 4 osy v jednom měřicím místě, prováděno za studena, kdy především u ohybů může docházet k deformaci vlivem teplotní dilatace. Toto měření tak nemusí identifikovat místní natečení v místě, které je nejvíce lokálně namáhané. Povolena deformace je 1 %.

Za účelem zlepšení současné metodiky pro kontrolu vysokotlakých parovodů byly testovány nové měřicí metody – 3D skenování a fotogrammetrie. Tyto metody jsou schopny zachytit kompletní povrch parovodu mimo návarky, při přesnosti řádově odpovídající stávající praxi. Výhodou těchto přístupů je možnost uchovat naskenovaná data pro průběžné meziroční sledování a porovnání s následujícími měřeními. Nové metody rovněž umožňují rozšířit stávající metodiku měření a vyhodnocování o další informace, např. absolutní pozici všech návarků vůči definovanému souřadnému systému, informaci o celkové deformaci potrubí ve všech osách (především u ohybů), sledování okolních ploch kvůli výskytu místních natečení.

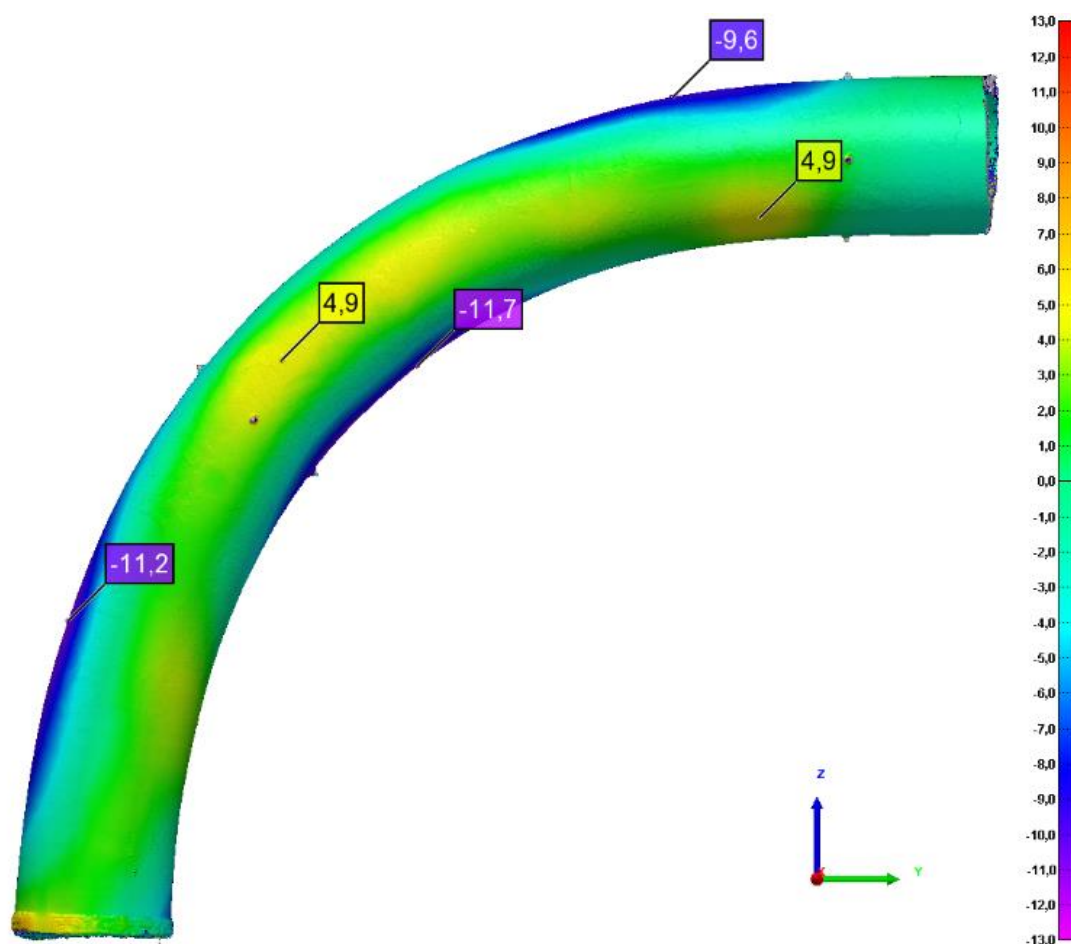
Testování nových metod se provádí za účelem zlepšení současné metodiky pro kontroly nejvíce namáhaných úseků vysokotlakých parovodů. Dílčím cílem je přechod z lokálního hodnocení tečení na plošné, stanovení velikosti deformace v po sobě jdoucích časových intervalech a identifikace lokálních deformací povrchu. Hlavním cílem zavedení diagnostického postupu, který umožní zpřesnění měření tečení, vnesení nové kvality vyhodnocení (rozměry, odchylky geometrie plochy a celkové i bodové deformace), zlepšení kvality opakovaných měření a identifikaci nejvíce namáhaných lokalit. Dosud není v provozní praxi známa metoda na identifikaci tohoto místa. Tímto způsobem bude možno vypracovat predikční model vyhodnocování tečení po celém obvodu.

3D skenování

Při všech měřeních bylo použito měřicí rameno s laserovým skenerem. Laserové skenery využívají pro určení své polohy v prostoru víceosá ramena se snímači natočenými v každé ose pohybu. Laserový snímač rozmítá na snímáný povrch laserovou čáru, která je snímána kamerou a reliéf povrchu je zjišťován trigonometricky. Hlavními výhodami tohoto zařízení je absolutní polohování vztahované k měřicí základně ramene a dobrý poměr rychlosti snímání k přesnosti a hustotě bodů.

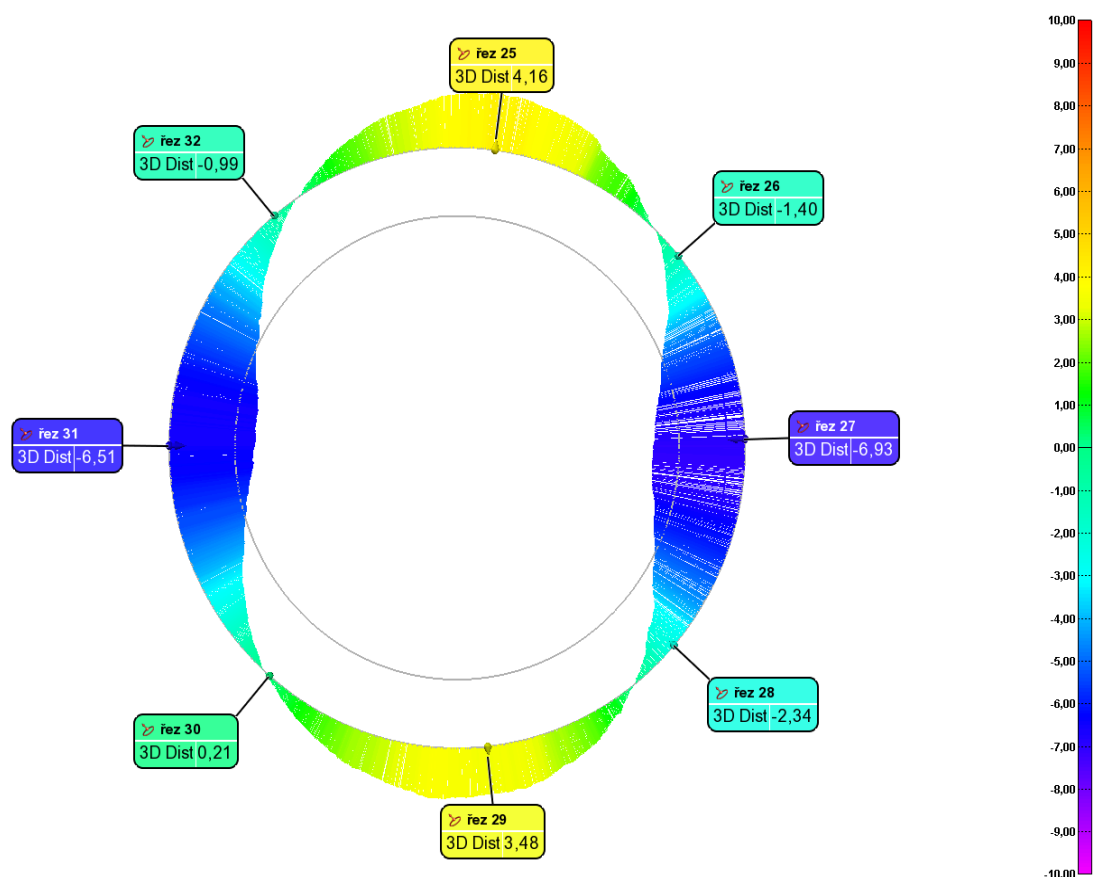
3D skenování bylo realizováno na celkem 9 ohybech parovodů elektráren Dětmarovice, Poříčí, Tušimice, Počerady a teplárny Trmice [1-5, 7, 8, 10]. Z naskenovaných dat byl nejprve vytvářen reverzní model, jehož vnější průměr byl určen na základě srovnání naskenovaného průměru s tabulkovými hodnotami. Tento reverzní model je čistě idealizovaný stav bez deformací z výroby a provozu. Všechny naměřené odchylky jsou vztaženy k tomuto idealizovanému modelu. V případě, že jsou k dispozici data z předešlého měření, je možné je použít jako referenci a měřit odchylky i vůči nim [10].

Pomocí 3D skenování se ve všech případech analyzovala celková geometrie ohybu kolene ke zjištění lokálních deformací. Celková geometrie se zobrazuje pomocí barevné mapy (obr. 1).

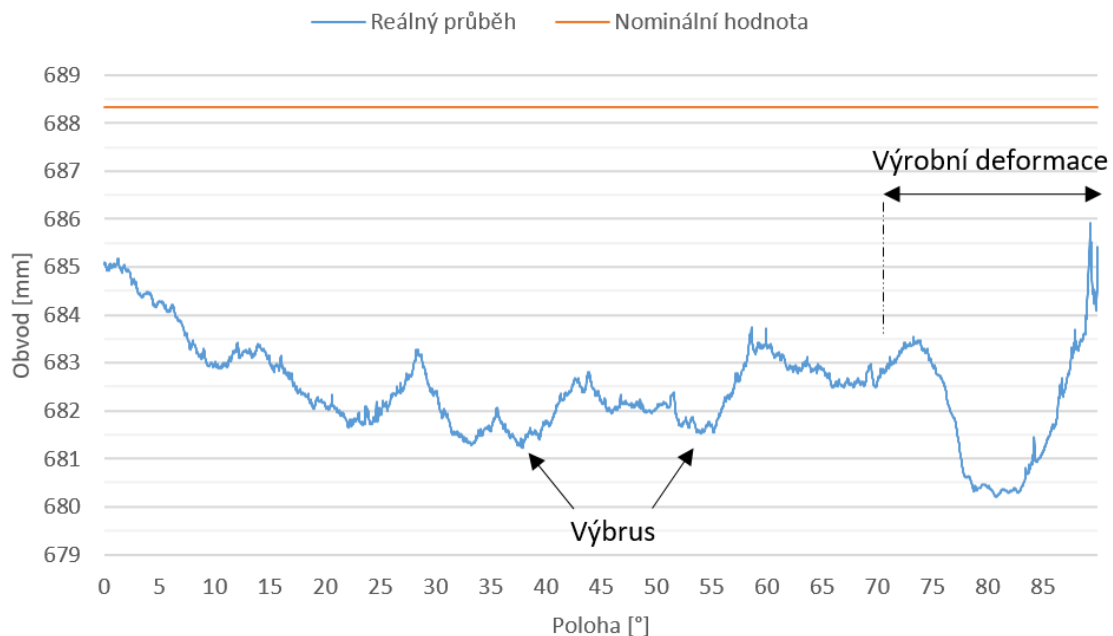


Obr. 1: Celková geometrie ohybu kolene, TTR B5, ohyb č. 6

Celkové odchylky na obr. 1 se skládají z odchylky vedení ohybu kolene a z odchylky v řezu. Kvůli oddělení těchto dvou složek je výhodné hodnotit geometrii v jednotlivých řezech, kde lze zkoumat pouze odchylky od ideální kružnice (obr. 2). Bylo zjištěno, že odchylky v řezech prokazují silnou korelaci s nálezy replik [6].



Obr. 2: Odchyly v řezu od ideální kružnice – pozice 45°, TTR B5, ohyb č. 6



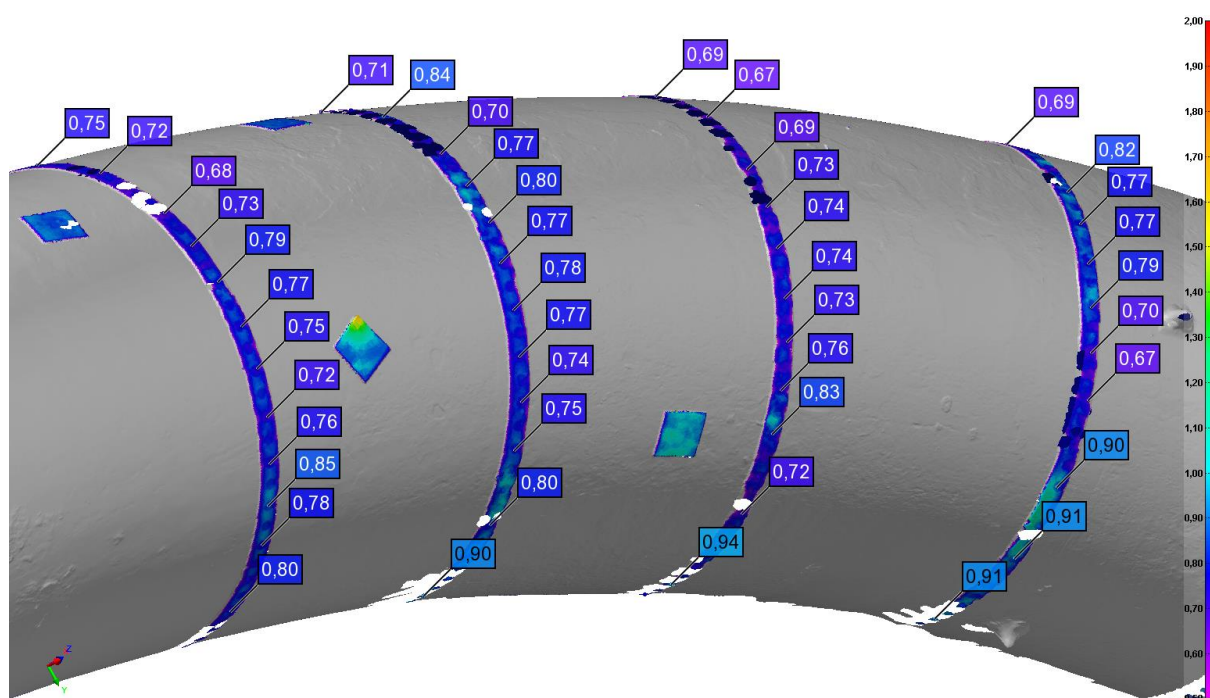
Obr. 3: Variace obvodu podél ohybu parovodu, TTR B5, ohyb č. 6

Mezi další vlastnosti, které byly hodnoceny v řezu, patří obvod [1, 2, 4, 5, 7-9] a ovalita [9]. Pomocí obvodu se integrálně stanovoval celkový povrch ohybu potrubí [11]. Z průběhu obvodu potrubí bylo možné spolehlivě identifikovat výrobní deformace, které mají sinusoidní průběh. Další odchyly obvodu podél ohybu parovodu mohou označovat deformace vzniklé tečením

materiálu. Nejlépe je natečení pozorovatelné na začátku ohybu parovodu, v místě vniku páry o teplotě 500 °C (obr. 3).

Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je měřicí metoda, která se zabývá rekonstrukcí tvaru, velikosti a polohy předmětů z jejich fotografických snímků. Používaným fotoaparátem pro provedení fotogrammetrická měření byla digitální zrcadlovka určená pro prostředí průmyslové výroby. Pro účely polohování byly vyrobeny magnetické pásky s referenčními značkami. Při jejich aplikování na povrch parovodu byly zjištěny odchylky od 3D skenování v rozmezí 0,65–0,95 mm, způsobené tloušťkou pásků (viz obr. 4). Maximální odchylky se nacházejí v místech se slabou přilnavostí poblíž okrajů pásku. Přesnost měření (2σ) za použití referenčních magnetických pásků činí 0,2 mm [3].

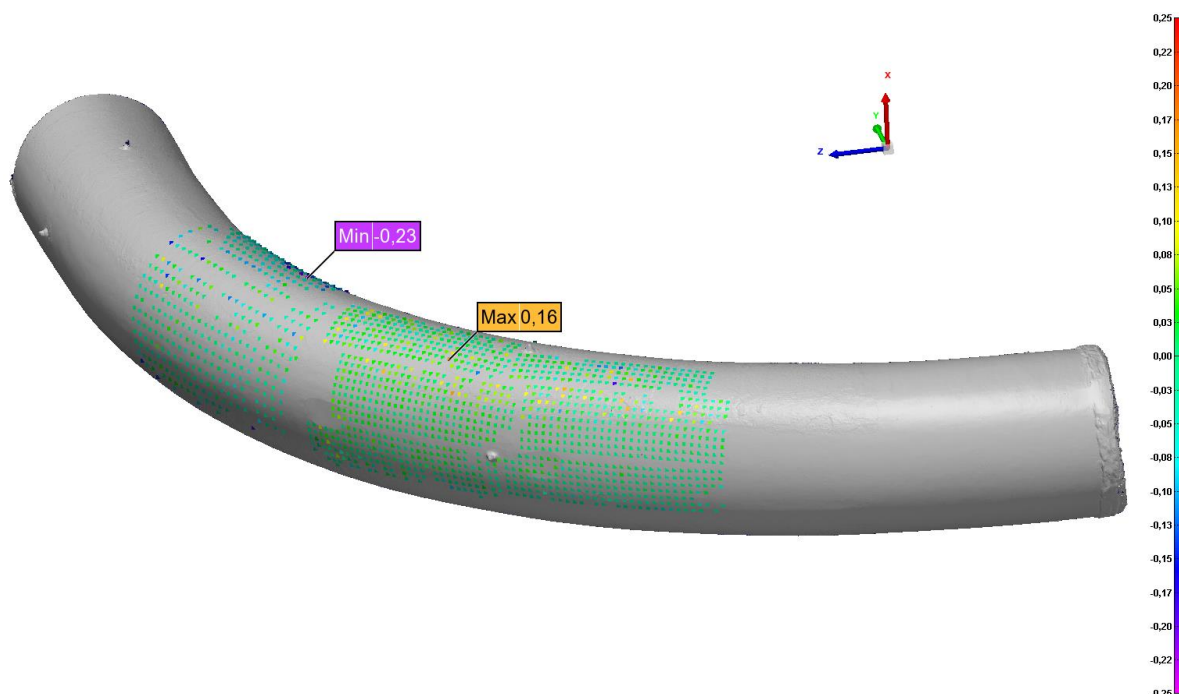


Obr. 4: Odchylky referenčních značek za použití magnetických pásků, TTR B5, ohyb č. 6

Pro snížení odchylek způsobených fyzickou tloušťkou magnetických pásků byly naneseny referenční značky pomocí spreje přímo na povrch ohybu parovodu. Testována byla dvojí velikost značek – průměr 5 mm a 10 mm (viz obr. 5 a obr. 6).



Obr. 5: Fotogrammetrické měření TTR B5, ohyb č. 6



Obr. 6: Odchytky nanesených referenčních značek od 3D skenu, TTR B5, ohyb č. 6

Z výsledků fotogrammetrického měření lze konstatovat, že referenční značky na rovných plochách měly odchylky do $\pm 0,05$ mm. Největší odchylky $\pm 0,25$ mm se objevují zejména v oblastech složitější topografie povrchu, kde dochází k optickému zkreslení tvaru referenční značky. Pro referenční značky o průměru 5 mm se projevují negativní vlivy zakřivení trubky a povrchových nerovností méně než pro značky o průměru 10 mm. Celková chyba (2σ) za použití nanesených referenčních značek o průměru 5 mm činila 0,09 mm [3].

Závěr

Po srovnání fotogrammetrie s 3D skenováním lze konstatovat, že u obou použitých metod lze dosáhnout řádově podobné přesnosti odpovídající desítkám μm . Zásadním rozdílem mezi oběma metodami je hustota sítě bodů neboli rozlišení.

3D skenování umožňuje vytvářet síť o vzdálenosti měřicích bodů řádově v desítkách μm , což umožňuje detailní hodnocení v řezu – měření odchylek od ideální kružnice, ovality, obvodu a obsahu. Integrací obvodu lze měřit povrch ohybu parovodu. Kvůli malé vzdálenosti od měřeného povrchu ale 3D skenování neumožňuje měření horkého parovodu přímo za provozu; měřit lze pouze při odstávce.

Fotogrammetrie má oproti 3D skenování velmi velkou vzdálenost měřicích bodů řádově v jednotkách mm a hodnocení v řezu je proto nepřesné. Možnou výhodou fotogrammetrie je možnost měřit parovody za provozu; měření za vysokých teplot je omezeno pouze tepelnou odolností použitých referenčních značek. Měření parovodu za provozu bude testováno v budoucnu.

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

Literatura

- [1] Patera, J., Zahrádka, P., Matějčíček, J. (červen 2018): *Analýza technického stavu VT převáděcího parovodu TG3 LS horní z elektrárny Dětmárovice*. Technická zpráva, PL2019, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [2] Patera, J., Matějčíček, J., Zahrádka, P. (červenec 2018): *Analýza technického stavu parovodu elektrárny Poříčí*. Technická zpráva, PL2047, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [3] Patera, J., Zahrádka, P., Matějčíček, J. (srpen 2018): *Testování nových technologií pro měření tečení na vyříznutém parovodu z K5 – ohyb č. 6 elektrárny Trmice*. Technická zpráva, PL2054, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [4] Matějčíček, J., Zahrádka, P., Patera, J. (srpen 2018): *Analýza technického stavu parovodu elektrárny Tušimice*. Technická zpráva, PL2062, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [5] Patera, J., Matějčíček, J., Zahrádka, P. (září 2018): *Analýza technického stavu výstupního parovodu z K6 – 4. ohybu od kotle elektrárny Trmice*. Technická zpráva, PL2040, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [6] Štastná, K. (prosinec 2018): *Statistické porovnání dat z 3D scanu a diagnostik*. Výzkumná zpráva, 6718, Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Brno.
- [7] Patera, J., Zahrádka, P., Matějčíček, J. (leden 2019): *Analýza technického stavu parovodu PK 11-2a/PL 12-2a z elektrárny Počeradý*. Technická zpráva, PL2288, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [8] Zahrádka, P., Patera, J. (leden 2019): *Analýza technického stavu VT parovodu Počeradý (náhyb 30°)*. Technická zpráva, PL2293, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [9] Patera, J., Zahrádka, P. (duben 2019): *Měření ovality na ohybu č. 6 parovodu TTR B5*. Technická zpráva, PL3059, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [10] Zahrádka, P., Patera, J. (červenec 2019): *3D sken ohybu č. 6 TTR B5 při zatížení*. Technická zpráva, PL3146, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [11] Patera, J. (červenec 2019): *Analýza plochy ohybu parovodů z 3D měření 2018-2019*. Technická zpráva, PL3165, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.

ZVÝŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ METODOU LASER SHOCK PEENING

INCREASE OF MATERIAL CYCLE FATIGUE LIFE TIME USING THE LASER SHOCK PEENING METHOD

Zbyněk Špirit ^{a,b)}, Jan Kaufman ^{c)}, Jan Brajer ^{c)}, Josef Strejcius ^{a)} a Michal Chocholoušek ^{a)}

^{a)} Centrum výzkumu Řez s.r.o., Morseova 1245/6, Plzeň, e-mail: zbynek.spirit@cvrez.cz

^{b)} Katedra materiálu a strojírenské technologie, Západočeská univerzita v Plzni

^{c)} HiLASE, Fyzikální Ústav AV ČR, v. v. i.

Abstrakt

Laser Shock Peening (LSP) se řadí mezi moderní bezkontaktní technologie zpevňování povrchu kovových materiálů na principu vzniku rázových vln, které se generují během interakce krátkých laserových pulzů s povrchem materiálu. Rázové vlny v materiálu vyvolávají strukturní změny, které mají za důsledek vznik zbytkového tlakového napětí a zvýšení tvrdosti, což obecně vede ke zlepšení únavových vlastností materiálu, zabraňování vzniku a šíření trhlin a zlepšuje odolnost vůči koroznímu praskání a opotřebení. V tomto článku se zabýváme aplikací technologie LSP na vzorky z nerezové austenitické oceli 08Ch18N10T, kdy po ovlivnění došlo k nejméně desetinásobnému prodloužení životnosti materiálu při vysokocyklických únavových zkouškách.

Abstract

Laser Shock Peening (LSP) is one of the modern contactless technologies for surface reinforcement of metallic materials. The technology is based on the shock wave principle generated during the interaction of short laser pulses with the surface of the material. Shock waves in the material induce structural changes that result in residual compressive stress and increase in hardness, generally resulting in improved fatigue properties of the material, preventing crack initiation and propagation, and improving resistance to corrosion cracking and wear. This paper deals with the application of LSP technology to stainless austenitic steel 08Ch18N10T, when the lifetime of the influenced material was prolonged at least ten times in the high-cycle fatigue tests.

Úvod

Technologii laserového vyklepávání neboli Laser Shock Peening (LSP) lze popsat jako metodu ovlivnění povrchu materiálu pomocí silných rázových vln, které vznikají při interakci krátkých (ns) vysokoenergetických laserových pulzů s hmotou. Vznik technologie lze vysledovat do počátku 70. let [1], nicméně první reálná aplikace přišla až v 90. letech, a to v podobě řešení problému odlamujících se lopatek leteckého motoru amerického bombardéru B1 a stíhacího letounu F101 v důsledku vnějšího poškození [2]. Od té doby byla technologie LSP aplikovaná k řešení dalších průmyslových problémů jako korozní praskání tlakových reaktorových nádob v Japonských jaderných elektrárnách [3] nebo tvarování křídel Boeingu 747-8. Hlavní překážkou v proniknutí technologie k menším aplikacím byla nedostupnost dostatečně výkonných malých levných laserových zdrojů. Avšak rapidní vývoj levných laserových zdrojů v posledních letech otevřel mnohé dveře v nejrůznějších oblastech výzkumu a průmyslových aplikací.

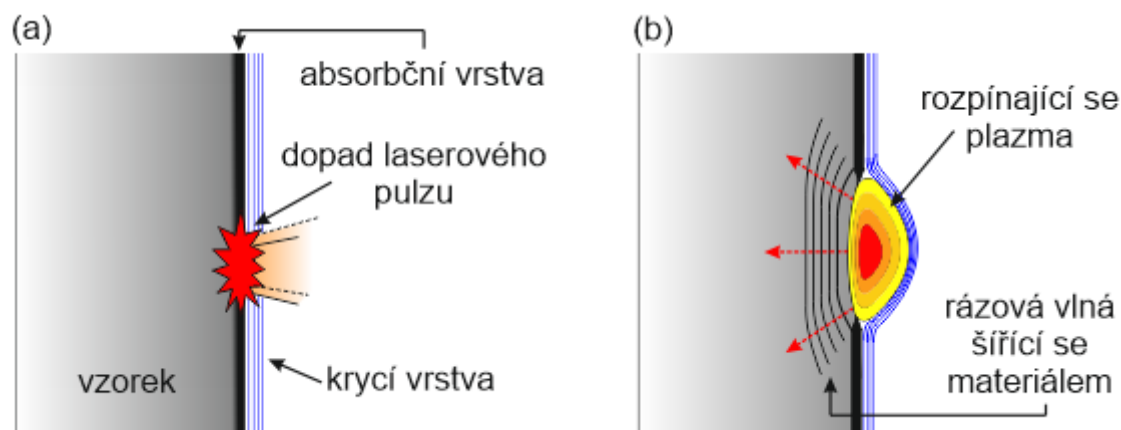
Z konvenčních procesů má k LSP nejbližší kuličkování [4], kdy je povrch materiálu ostřelován kovovými nebo skleněnými projektily o vysoké rychlosti. V tomto případě rovněž dochází ke vzniku tlakových zbytkových napětí, nicméně oproti LSP dosahují malých hloubek (cca 250 µm), zatímco u LSP sahá napětí do hloubky typicky přes 1 mm, v závislosti na tloušťce

vzorku. Další výhodou LSP oproti kuličkování je přesná kontrola nad místem dopadu jednotlivých laserových pulzů, zatímco pokrytí větších ploch se u kuličkování dosahuje statistickým překryvem náhodných dopadů jednotlivých projektilů. Výsledná drsnost povrchu po zpracování LSP je rovněž lepší, kdy se u kuličkování musí výsledný povrch většinou dobrousit nebo doleštit, zejména pak u aplikací, kde opotřebení materiálu hraje roli.

Technologii LSP lze aplikovat na širokou škálu materiálů, od nejrůznějších hliníkových slitin [5], čtených typů oceli [6] a měděných slitin [7] až po zinek [8], slitiny niklu [9], slitiny hořčíku [10], amorfních kovů [11] a dalších.

Princip LSP technologie

Před ovlivněním je vzorek pokryt tenkou absorbní vrstvou, což nejčastěji bývá černá lepicí páska nebo černá barva. Tato vrstva napomáhá absorpci laserového záření, ale hlavně pak chrání povrch vzorku před tepelnými jevy, které doprovázejí absorpci laserového pulzu. Působení na vzorek je pak čistě mechanického rázu. Při ovlivnění po vzorku laminárně stéká uniformní vrstva vody, jejíž funkce je dočasné uvěznění vzniklého rozpínajícího se plazmatu na povrchu vzorku, což vede ke vzniku déle trvajících mechanických tlaků (desítky ns) o větší velikosti (jednotky GPa) [12]. Díky tomuto jevu není k dosažení vysokých tlaků potřeba vakua [1]. Dopadající laserový pulz je fokusován čočkou, projde vodní vrstvou a odpaří malou část absorbní vrstvy (obr. 1a). Vznikne rapidně se rozpínající plazma, které absorbuje zbytek pulzu. Plošná hustota výkonu se přitom pohybuje od 1 do 10 GW/cm². Při rozpínání plazmatu vzniká rázová vlna, která se šíří materiálem (obr. 1b). Pokud je tlak dostatečný, dojde k překročení elastického limitu materiálu a v místě dopadu pulzu vznikne lokální plastická deformace. To má za následek vznik tlakových zbytkových napětí sahající do hloubky větší než 1 mm. K rovnoměrnému ovlivnění větší plochy se ovlivňovaný vzorek vůči laseru posouvá a jednotlivé pulzy se tak skládají vedle sebe v předem definovaném vzoru s nenulovým překryvem. Strategie ovlivnění má vliv na rozložení zbytkových napětí [5].



Obr. 6: Zjednodušené schéma LSP procesu. Dopadající laserový pulz odpaří absorbní vrstvu a mezi vzorkem a vodní vrstvou vznikne expandující plazma, které v materiálu vyvolá rázovou vlnu.

Materiál

Jako testovací materiál byla použita austenitická ocel 08Ch18N10T s certifikátem EN 10204/3.1 pro použití v jaderném průmyslu. 08CH18N10T ((AISI 321, 1.4541) jde o chrom-niklovou stabilizovanou ocel žáruvzdornou ocel. Ocel se hojně používá v jaderném průmyslu, například jako obálka tlakové nádoby VVER reaktorů, potrubí pro primární okruh

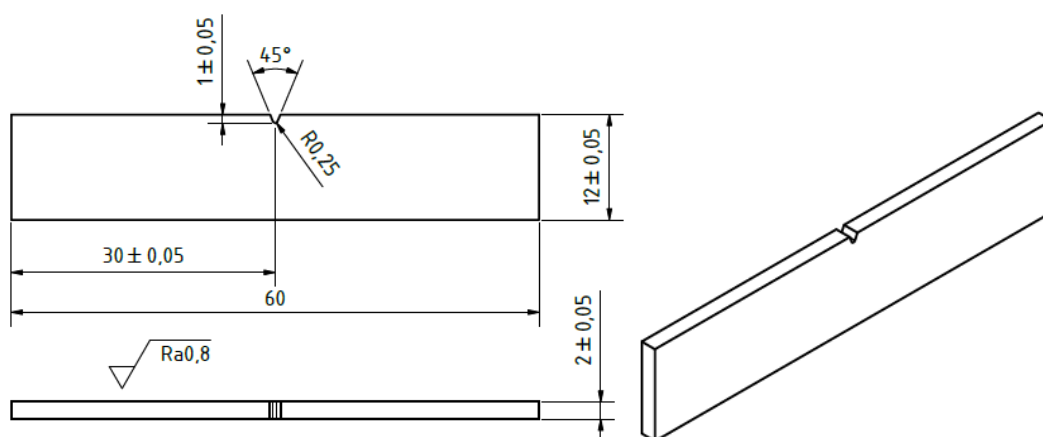
chlazení a další [14]. Komponenty bývají často únavově namáhané a musejí odolávat koroznímu prostředí za vyšších teplot. Základní chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 2. U materiálu 08CH18N10T byla testována odolnost proti vysoko cyklické únavy v ohybu. Pro HCF zkoušky byl vybrán typ zkušební tělesa, viz obr. 2.

Tab. 1: Základní chemické složení – 08CH18N10T

Materiál	Fe [wt.%]	C [wt.%]	Mn [wt.%]	Si [wt.%]	P [wt.%]	S [wt.%]	Cr [wt.%]	Ni [wt.%]	Cu [wt.%]	Mo [wt.%]	Ti [wt.%]
08CH18N10T	-	0,05	1,68	0,57	0,02	0,001	17,5	9,9	0,06	0,06	0,47

Tab. 2: Základní mechanické hodnoty – 08CH18N10T

Materiál	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
08CH18N10T	248	565	54,5

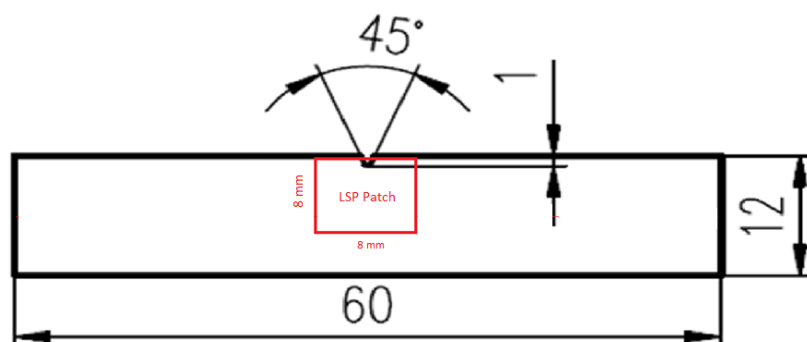


Obr. 2: Zkušební těleso pro únavové zkoušky třibodovým ohybem

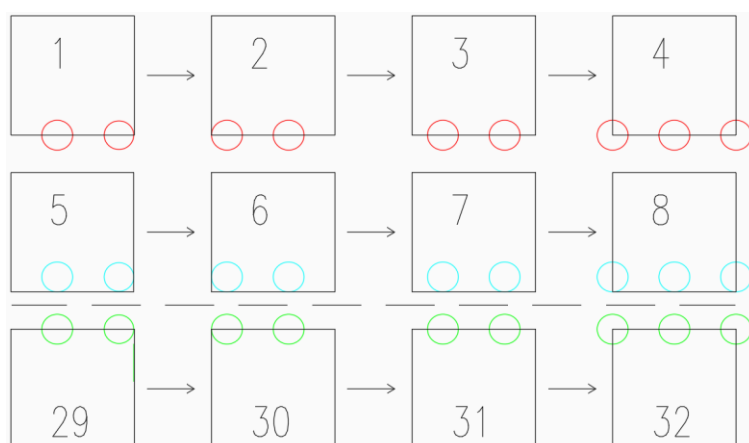
Experimentální činnost

Hlavním cílem experimentu bylo zvýšení mechanických vlastností (vysoko cyklická únava) pomocí technologie LSP. Experiment se zaměřil na porovnání únavových vlastností materiálu 08CH18N10T před a po aplikaci LSP. Zpevněná oblast na vzorku měla rozměr 8x8 mm a byla aplikována z obou stran zkušební tělesa, viz obr. 3. Pro zpevnění této oblasti byl použit laserový systém Bivoj ve výzkumném centru HiLASE, který dodal pulzy o energii 2,5 J, s délkou pulzu 10 ns, s velikostí laserové stopy 2 mm a s plošnou hustotou výkonu 6,25 GW/cm². Opakovací frekvence laseru byla 10 Hz. Vzorky byly ovlivněny z obou stran 1 vrstvou s 50% překryvem pulzů. Plošná hustota energie byla 250 J/cm². Během ovlivnění byl vzorek pokryt černou vynilovou páskou o tloušťce 120 um a po vzorku stékala laminární vrstva vody 2 mm tlustá.

Pro dosažení co největšího tlakového zbytkového napětí v místě pod vrubem zkušební tělesa byla použita strategie polohy a pořadí jednotlivých vtisků dle obr. 4 [13].



Obr. 3: Ovlivněná oblast na zkušební tělese pro mechanické zkoušky

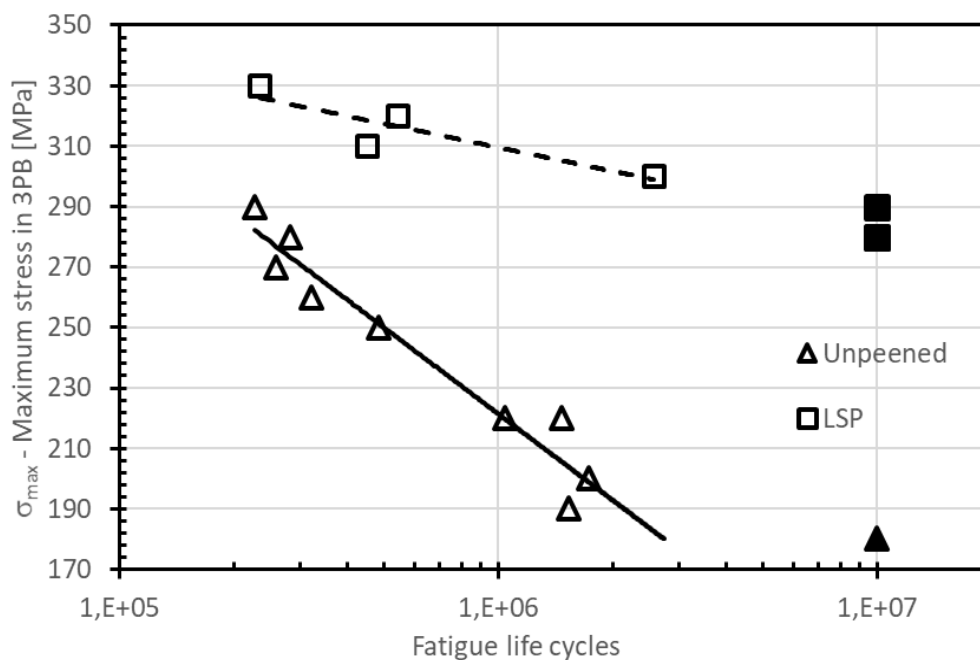


Obr. 4: Strategie vtisků po jednotlivých řádcích v ovlivněné oblasti 8x8 mm

Únavové zkoušky byly provedeny na Elektrodynamickém pulsátoru – RUMUL v režimu síly. Vzorky byly namáhány třibodovým ohybem se vzdáleností podpor 40 mm, $R = 0,1$, frekvencí 90-92 Hz, stopovací podmínka byla při poklesu frekvence o 20 Hz, teplota testování byla 22 °C.

Výsledky

Výsledkem únavových zkoušek materiálu 08CH18N10T ve zpevněném a nezpevněném stavu jsou na obr. 4. Hodnota únavové životnosti pro jednotlivé zkušební tělesa byla vyhodnocena při poklesu delta frekvence o 20 Hz (trhlina se šířila cca. do poloviny výšky zkušební tělesa). Z únavových křivek je patrné, že únavová životnost (10^7 cyklů) u zpevněného materiálu je na hodnotě $\sigma_{\max}$ 280 MPa u nezpevněného materiálu 180 MPa. Zpevněný materiál dosahuje o více jak 50 % vyšší únavovou životnost než nezpevněný.



Obr. 4: Únavová životnost materiálu 08Ch18N10T ve zpevněném (LSP) a nezpevněném stavu

Závěr

Technologie LSP byla od doby svého vzniku úspěšně aplikována na vyřešení několika významných průmyslových problémů, nicméně její záběr byl vždy poměrně úzký. Jejím širšímu rozšíření především bránily malá rychlost ovlivnění a vysoká cena. S novou generací levných, výkonných a spolehlivých laserových zdrojů má LSP potenciál dostat se do popředí špičkových průmyslových technologií ovlivnění povrchu.

Účinky LSP byly demonstrovány na testech vysokocyklické únavy u asutenitické oceli 08CH18N10T. Z výsledků měření vyplývá, že při použití technologie LSP za účelem zpevnění povrchu zkušebních těles namáhaných tříbodovým ohybem, byla zvýšena únavová životnost materiálu o více jak 50%. Pro dosažení maximálního tlakového vnitřního napětí v oblasti vrubu byla použita strategie rozmístění jednotlivých vtisků dle numerické simulace.

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

Literatura

- [1] Anderholm, N. C. (1970): *Laser generated stress waves*. Applied Physics Letters, Vol. 16, No. 3, paper 10.1063/1.1653116. ISSN 0003-6951
- [2] Clauer, A., Koucky, J. (1991): *Laser Shock Processing Increases the Fatigue Life of Metal Parts*. Materials and Processing Report, Vol. 6, No. 6, doi: 10.1080/08871949.1991.11752452. ISSN 1066-7857

- [3] Sano, Y., Akita, K., Masaki, K., Ochi, Y., Altenberger, I., Scholtes, B. (2006): *Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology*. Journal of Laser Micro / Nanoengineering, Vol. 1, No. 3, doi: 10.2961/jlmn.2006.03.0002. ISSN 1880-0688
- [4] Gujba, A. K., Medraj, M. (2014): *Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening*. Materials, Vol. 7, No. 12, pp. 7925-7974. ISSN 1996-1944
- [5] Hfaiedh, N., Peyre, P., Song, H., Popa, I., Vignal, V. (2015): *Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy*. International Journal of Fatigue, Vol. 70, pp.480-489, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.05.015. ISSN 0142-1123
- [6] Yoshihiro, S., Yuji, S., Rie, S., You-Chul, K. (2012): *Fatigue Life Enhancement of Fillet and Butt Welded Joints after Laser Peening*. Transactions of JWRI, Vol. 41, No. 1, pp. 71-76. available on <http://hdl.handle.net/11094/23163>, ISSN 03874508
- [7] Ye, Ch., Suslov, S., Lin, D., Liao, Y., Cheng, G. J. (2014): *Cryogenic ultrahigh strain rate deformation induced hybrid nanotwinned microstructure for high strength and high ductility*. Journal of Applied Physics, Vol. 115, No. 21, paper 213519, doi: 10.1063/1.4881555. ISSN 0021-8979
- [8] Thareja, R.K., Shukla, S. (2007): *Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by laser ablation of zinc in liquid*. Applied Surface Science, Vol. 253, No. 22, pp. 8889-8895, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.04.088. ISSN 0169-4332
- [9] Bugayeva, A.A., Guptab, M.C., Payne, R. (2006): *Laser processing of inconel 600 and surface structure*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44, No. 2, pp. 102-111, doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.04.014. ISSN 0143-8166
- [10] Zhang, Y., You, J., Lu, J., Cui, Ch., Jiang, Y., Ren, X. (2010): *Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy*. Surface and Coatings Technology, Vol. 204, No. 24, pp. 3947-3953, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.015. ISSN 0257-8972
- [11] Fu, J., Zhu, Y., Zheng, C., Liu, R., Ji, Z. (2014): *Effect of laser shock peening on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass*. Applied Surface Science, Vol. 313, pp. 692-697, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.06.056. ISSN 0169-4332
- [12] Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., Virmont, J. (1990): *Physical study of laser produced plasma in confined geometry*. Journal of Applied Physics, Vol. 68, No. 2, paper 775, doi: 10.1063/1.346783. ISSN 0021-8979
- [13] Bhamare, S., Ramakrishnan, G., Mannava, S. R., Langer, K., Vasudevan, V. K., Qian, D. (2013): *Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy*. Surface and Coatings Technology, Vol. 232, pp. 464-474. ISSN 0257-8972
- [14] Fekete, B., Szekeres, A. (2015): *Investigation on partition of plastic work converted to heat during plastic deformation for reactor steels based on inverse experimental-computational method*. European Journal of Mechanics – A/Solids, Vol. 53, pp. 175-186. ISSN 0169-4332

LTOs – DATOVÁ ZÁKLADNA PRO ŘÍZENÍ ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ

LTOs – DATABASE FOR LIFE CONTROL OF EQUIPMENT

Pavel Cvešpr

I&C Energo a.s., Holandská 10, 639 00 Brno, tel: +420 606 718 987,
e-mail: pcvespr@ic-energo.eu

Abstrakt

Informační systém LTOs řeší problematiku sběru, zpracování a vyhodnocení dat z diagnostik, revizí a zkoušek energetických zařízení, které jsou využity pro sledování životnosti zařízení a pro podporu přípravy dlouhodobého provozu zejména v oblasti energetiky jaderné. Účelem příspěvku je představit nové funkčnosti tohoto systému vyvinuté na základě zkušeností koncových uživatelů s jeho dlouholetým užíváním.

Abstract

Information System LTOs solve issues of collection, processing and data evaluation from diagnostics, review and testing of energy equipment. These stored data are used for requirements of Ageing management of equipment and for support of preparation for Long Term Operation in the area of nuclear energetics. Aim of the article is to reveal new functionalities in mentioned SW which were developed on base of experience of end users and by its long age operating.

Úvod

Proces řízení životnosti představuje celý komplex vzájemně provázaných činností, který pro definovaná zařízení stanovuje postupy, sledy činností, role, odpovědnosti, vstupy a zpětné vazby. Obsahuje popis zařízení a degradační mechanismy na ně působící, výčet programů – pracovních postupů důležitých pro řízení životnosti, stanovení limitů omezujících další provoz, definované výstupy atd. Očekávaným výsledkem je predikce dožití zařízení.

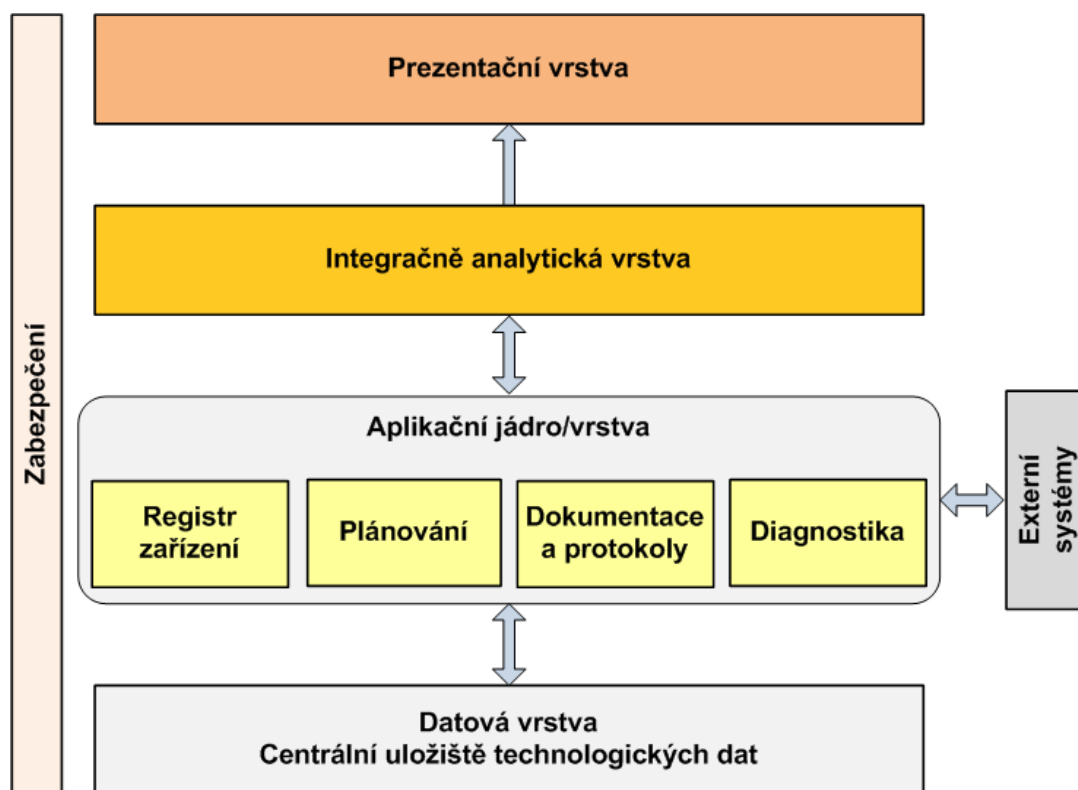
Základní přístup k řízení životnosti výrobního zařízení elektráren ČEZ v divizích jaderná a klasická energetika je řešen pomocí Programů řízení životnosti platných pro jednotlivé typy zařízení. Jejich aplikace na konkrétní zařízení je realizována formou Technických standardů a Implementačních programů řízení životnosti pro danou elektrárnu.

Tyto skutečnosti byly promítnuty do SW řešení s cílem provozovat daný informační systém jako podporu projektu LTO tak, aby zainteresovaní pracovníci na různých stupních řízení životnosti měli pro svoje rozhodování k dispozici dostatek relevantních informací.

LTOs je koncipován jako typická klient-serverová aplikace. Umožňuje shromažďovat informace k zařízení v potřebné hloubce členění, tyto informace vyhodnocovat a navrhnout opatření k dosažení očekávané míry spolehlivosti provozu.

LTO suite

Informační systém LTO suite (LTOs) [1] byl navržen jako modulární systém sestávající z datové vrstvy, aplikačního jádra (Registr zařízení, Dokumentace a protokoly, Plánování a Diagnostika), modulu zabezpečení, integračně-analytické vrstvy (IA vrstva), prezentační vrstvy a rozhraní (interface) k propojení na systém pro řízení údržby Asset Suite a na ostatní méně významné SW aplikace.



Obr. 1: Architektura SW řešení problematiky řízení životnosti

Registr zařízení

Modul Registr zařízení představuje základní modul systému LTOs. Eviduje zařízení a měřidla včetně jejich technických parametrů. Tímto modulem prochází veškeré datové a informační toky mezi moduly sběru a hodnocení dat. Z důvodu řízeného přístupu uživatelů k informacím uloženým v LTOs je registr členěn do kategorií strojní, stavební, elektro, měření a regulace.

V současné době je v LTOs evidováno celkem 105 410 zařízení včetně komponent z toho pro jaderné elektrárny 34 400 položek.

Modul Plánování

Modul Plánování slouží k plánování diagnostik, revizní a kontrolní činnosti na výrobním zařízení a také k plánování kalibrací měřidel. Výstupem z modulu jsou krátkodobé a dlouhodobé plány generované na podkladě znalostí cyklů a data poslední provedené kontroly pro příslušnou diagnostickou metodu. Roční plány obsahují cca 25 000 položek s možností průběžného sledování plnění plánu.

Tyto informace vstupují do modulu Dokumentace a protokoly, který provádí automatizované zpracování údajů z protokolů jako výsledek realizace plánovaných činností.

Modul Diagnostika

Modul Diagnostika poskytuje nástroje pro sledování a archivaci hodnot parametrů popisujících stav turbín, tlakových částí kotlů a parovodů, ocelových a stavebních konstrukcí, technologie odsíření, transformátorů a ostatních elektrozařízení.

Pro divizi Jaderná energetika je alternativou k Diagnostice modul Řízení stárnutí, který ukládá informace předepsané v jednotlivých PŘS (Programy Řízeného Stárnutí), kde je stanoveno, v jakém rozpadu na komponenty se má zařízení sledovat, výčet působících degradačních mechanismů, indikace dosažení/překročení limitních hodnot, trendy růstu naměřených hodnot atd. Jedná se především o tato zařízení primárního okruhu:

- tlakové nádoby reaktoru,

- hlavní cirkulační čerpadla,
- hlavní uzavírací armatury,
- kompenzátory objemu,
- parogenerátory,
- vysokoenergetická potrubí,
- kabely.

Uložené informace jsou vstupními údaji pro zjištění technického stavu sledovaného zařízení a stanovení jeho vývoje stárnutí do budoucnosti formou reportu hodnocení zařízení, zpracované v modulu integračně – analytická vrstva. Tato vrstva provádí integraci vstupů automaticky dle nastavitelných konfigurací a expertovi poskytuje dostatek podkladů k provedení analýzy výsledků z jednotlivých programů řízeného stárnutí a k vystavení zprávy z hodnocení životnosti sledovaného zařízení.

Modul Integračně analytická vrstva

IA vrstva slouží k integraci a analýze výsledků z jednotlivých programů řízeného stárnutí, které jsou navedeny k danému zařízení, a z jiných informačních zdrojů dle zásad stanovených v příslušných Technických standardech ČEZ, a. s. Na základě těchto integrovaných informací může expert, který je pověřen řízením životnosti daného zařízení, vložit finální výrok o technickém stavu zařízení s doporučením pro jeho další provoz. Je možno hodnotit jednotlivá zařízení nebo skupiny zařízení. Pro hodnocení se používá jednotná klasifikační stupnice se slovním vyjádřením v celkovém závěru, jak je znázorněno na obr. 2.

IA vrstva - zařízení a komponenty

Globální filtr

Zařízení

IA vrstva - skupiny

IA vrstva - zařízení a komponenty

Zobrazit filtr

Tisk

Obnovit

Export

Generovat hodnocení

Aktuální rating

Data do AS6

Historie

Přetáhněte sem záhlaví sloupce pro seskupení podle tohoto sloupce

TMID	OJ	Elna	LC	TC	SZ	Blok	Blok	Název zařízení	Číslo zařízení	Hodnocení	Celkový závěr	Šetřeno k da	Uzavřeno	PRD	PR
1000662	TU	ETU2	AO	OA	ODS.ODLUC.KAPEK	63	63	Odlučovač kapek - jemn	K1HTF01AT021	B	Viditelná část kazet (segmentů)	28.7.2018	28.3.2019	2036	
1057676	LC	ELC				11		Generátor - synchronní	1MKA	B	ELCHO TG1 v.č. 12006407, typ	31.7.2018	1.8.2018		
1057677	LC	ELC				12		Generátor - synchronní	2MKA	B	ELCHO TG2v.č. 12006408, typ	31.7.2018	1.8.2018		
1000656	TU	ETU2	AO	OA	ODS.ABSORBER	63	63	ABSORBÉR K	K1HTF01BB001	D	(HUGECL0B)	7.8.2018	28.3.2019	2021	
6007164	PR	EPR1	AO	OA	ODS.ABSORBER	13	13	Absorber	3HTD10BB001	C	Naměřené tloušťky pogumu byly v celém kontrolovaném prostoru absorberu vyhovující. Na kónusu absorberu byl aplikován nový ochranný pogum. Hodnoty pevnosti v odlepu pogumu absorberu K (Chemoline 4B) jsou po cca 9 letech provozu nevyhovující. Za cca 9 let provozu se hodnoty soudržnosti snížily o 43% (za jemným odlučovačem), 49% (první sprchové patro) a 63% (oxidační rošt). Bylo provedeno ověření mechanických vlastností svarového spoje a základního materiálu trubky PP-H100 (potrubí rozstřiku). Zkouška tahem základního materiálu a tahem a ohybem svaru byla provedena podle norem ČSN EN 12814 - 1, ČSN EN 12814 - 2. Zkouška ohybem svaru byla nevyhovující. Dne 2. 11.2018 byla zjištěna netěsnost pláště absorberu K v oblasti úrovně REAplus. Doporučení pro údržbu: Vzhledem k technickému stavu zařízení doporučuji provést opravy při GO 2021, které budou vyžadovat významné investice. Při plánované GO v roce 2021 doporučuji kompletní výměnu pogumu nebo náhradu za jiný typ antikorozní ochrany (povlak/tapetáž). Doporučuji provést nápravná opatření, která budou zajišťovat předepsanou pevnost svarového spoje při namáhání na ohyb. Na základě netěsnosti stěny absorberu v prostoru REA+ bude				
6504911	PR	EPR1	AE	EA	ELE.GENERATOR	13	13	Generátor synchronní s	13MKA01	B					
6007223	PR	EPR1	AO	OA	ODS.ABSORBER	13	13	Odlučovač kapek hrubý	3HTD10BB001	B					
6007224	PR	EPR1	AO	OA	ODS.ABSORBER	13	13	Odlučovač kapek jemný	3HTD10BB001	B					
6500704	VD	EDS1	BS	BE	ELE.GENERATOR	91	91	Generátor - synchronní	91MLA10	C					
1000640	TU	ETU2	AO	OA	ODS.ABSORBER	61	61	ABSORBÉR J	J1HTF01BB001	C					
1000645	TU	ETU2	AO	OA	ODS.ODLUC.KAPEK	61	61	Odlučovač kapek - hrub	J1HTF01AT020	B					
1000646	TU	ETU2	AO	OA	ODS.ODLUC.KAPEK	61	61	Odlučovač kapek - jemn	J1HTF01AT021	B					
1058032	LC	ELC				11		TG1	1MAD	C					
1058036	LC	ELC				12		TG2	2MAD	C					
1058041	LC	ELC				11		Rotor generátoru	1MKA	B					
1058034	LC	ELC				11		Rotor turbíny	1MAD	B					
1058042	LC	ELC				11		Stator generátoru	1MKA	B					
1058033	LC	ELC				11		Tělesa TG	1MAD	B					
1058035	LC	ELC				11		Ventily	1MAD	C					
1058044	LC	ELC				12		Rotor generátoru	2MKA	B	Poslední kontrola generátoru při	27.8.2018	30.1.2019		
1058045	LC	ELC				12		Rotor turbíny	2MAD	C	Poslední revize při GO v 2012. F	27.8.2018	30.1.2019		

Obr. 2: Hodnocení zařízení v IA vrstvě

Prezentační vrstva

Prezentační vrstva umožňuje nad strukturovaně uloženými daty v datovém skladu LTOs vytvářet v jednotlivých modulech účelové výstupy ve formě hodnotících zpráv ve formátu pdf (např. Health Report, Periodické Hodnocení Životnosti). Dále je možno využít prezentaci výstupů v tabelární a grafické formě.

Periodické hodnocení životnosti za rok: 2018	
Skupina HCČ EDU	
Č. dokumentu v CTA a AS6: JCHO/TKEP/PHŽ/HCČ/EDU/2018/1	
PŘS dle ECM:	ČEZ_ME_1124 PŘS komponentní hlavní cirkulační čerpadlo
Elektrárna:	Elektrárna Dukovany
Blok / kampaň (projektová životnost; požadovaný rok konce provozu):	1RB / 32 (2015; 2025) 2RB / 31 (2016; 2026) 3RB / 31 (2016; 2026) 4RB / 30 (2017; 2027)
Zařízení:	1YD11D01; 1YD12D01; 1YD13D01; 1YD14D01; 1YD15D01; 1YD16D01; 2YD11D01; 2YD12D01; 2YD13D01; 2YD14D01; 2YD15D01; 2YD16D01; 3YD11D01; 3YD12D01; 3YD13D01; 3YD14D01; 3YD15D01; 3YD16D01; 4YD11D01; 4YD12D01; 4YD13D01; 4YD14D01; 4YD15D01; 4YD16D01
Výčet parametrů s překročenými mezními hodnotami	
Na skupině zařízení byly za hodnocené období indikovány parametry s překročenou mezní hodnotou (dotčené konkrétní pozice jsou zřejmé z podrobného hodnocení, viz příloha):	
TSTPRŽP0238 Nevhovující protokoly PPK V hodnoceném období se vyskytl/y nevhovující protokol/y - viz příloha 2.	
TSTPRŽP0303 Rozsah a úroveň preventivní údržby Nedostatečné - odstavení 4RB, z důvodu zvýšeného tlaku na výstupu z ucpávek HCČ - vvdření uhlíkové plochy ucpávky čerpadla HCČ45.	

Obr. 3: Část úvodní strany reportu hodnocení skupiny hlavních cirkulačních čerpadel EDU

Zabezpečení

Modul Zabezpečení řídí přístupy uživatelů k datům v jednotlivých modulech pro čtení a editaci. Uživatelé jsou přiřazena příslušná oprávnění ve vazbě na elektrárnu.

Správa oprávnění uživatelů

Globální filtr

Správa oprávnění uživatelů

Práva uživatelů

Přehled uživatelů

Přehled administrátorů

Přehled oprávnění

Přidat pár uživatel - oprávnění

Provést změny

Zobrazit filtr

Obnovit

Export

Tisk

Všechny elektrárny

Oprávnění	ECH	EDE	EHO	ELE2	ELE3	ELE4	EME2	EME3	EPC	EPO2	TDK	EPR1	EPR2	ETI1	ETI2	TTR	ETU1	ETU2	EVI	EET	ELC	EPC2	EDA	EDS1	EHIN	EKA
LTO - PRŽ - PRŽ tlakový systém kotle - AMT																										
LTO - PRŽ - PRŽ transformátor - AMT																										
LTO - PRŽ - PRŽ VT a ST parovodů - AMT																										
LTO - Ageing Management Review																										
LTO - čtenář																										
LTO - kategorie - Armatury																										

Obr. 4: Přidělení oprávnění pro jednotlivé lokality

Závěr

Organizované uložení všech dat prostřednictvím LTOs zajišťuje jednotný přístup k informacím o technickém stavu zařízení, jeho provozu, údržbě a diagnostice. Poskytuje dostatek informací pro kvalifikované posouzení míry rizika vyplývající z provozování sledovaného zařízení okolo předpokládaného (projektovaného) roku jeho dožití.

Literatura

- [1] I&C Energo a.s. (2014): *Cílový koncept (51482 Projekt LTO, 2.). Realizace SW řešení LTO*. Dodavatel OT Energy Services a.s.

OPRAVY TĚLES VENTILŮ PARNÍCH TURBÍN SVAŘOVÁNÍM

WELDING REPAIR OF STEAM TURBINE VALVE BODIES

Karel Kaleta

ČEZ, a. s.

Abstrakt

Tělesa ventilů parních turbín mají mnoho geometrických prvků. Jsou vystavena vysokým teplotám, vysokým tlakům a poměrně rychlému cyklování mezi různými provozními stavy. Ventily jsou vyrobeny jako odlitky nebo výkovky. Charakter jejich provozní expozice je dán teplotou a tlakem, ale také technologií výroby těchto těles. Tělesa mají často relativně tlustostěnné průřezy, které ovšem zvyšují tepelné namáhání ventilu. Tepelné a provozní napětí způsobí, že se v tělesech ventilu vytvoří praskliny, které se pak monitorují při plánovaných odstávkách, případně se musí selektivně opravit na základě zkušeností a uvážení výrobce ventilu, resp. provozovatele.

Abstract

The valve bodies utilized in steam turbines have a multitude of geometric features and are subjected to high temperatures, high pressures, and rapid cycling to and from these conditions. The valves are manufactured from well-engineered castings or forgings. The working temperatures and pressures as well as manufacturing considerations often lead to relatively thick-walled valves which increase the thermal stresses on the valve. Often, the thermal and operational stresses cause the valve bodies to develop cracks which are then monitored at outages and selectively repaired based on the experience and discretion of the owner.

Úvod

Tělesa vysokotlakých ventilů parních turbín v uspořádání s kotlem pracují s parametry okolo 530 °C a 16 MPa. U 200 MW kotlů je obvykle plánovaná životnost pro použité materiály parovodů 200 000 hodin. U těles ventilů se tedy automaticky předpokládá splnění tohoto parametru. Při odstávkách bloku, zpravidla během generálních oprav turbín, není výjimkou, že jsou při diagnostikách rozebraného, resp. odizolovaného ventilu zachyceny trhliny na jeho vnitřním, resp. vnějším povrchu. Klíčovým problémem je rozhodnutí o možnosti provozu ventilu s takovým defektem, resp. nutnosti opravy nebo jeho výměny. Během napěťových stavů při spouštění a odstavování zařízení dochází k praskání tepelnou únavou materiálu. Dominujícím faktorem pro vznik a růst defektu je tepelné namáhání průřezu, představující kombinaci tloušťky stěny, geometrického uspořádání ventilu a teplotní gradient ve stěně.

Scénář opravy

Při zachycení defektu vizuální nebo defektoskopickou kontrolou (obr. 1) následuje detailnější proměření trhliny, aby mohlo být přijato rozhodnutí o dalším postupu. V praxi u menších defektů postačí zpravidla vybroušení trhliny do plynulých, oblých přechodů k okolnímu materiálu s následnou nedestruktivní kontrolou. Zbytková tloušťka stěny pak musí splňovat požadavky pevnosti. Pokud však je hloubka trhliny vzhledem ke zbytkové nezasažené tloušťce stěny větší, je nutno přistoupit po celkovém vybroušení zasažené oblasti a k nahrazení vybroušeného materiálu (tab. 1) svařováním. Problematické jsou situace, kdy defekt je na vnitřní straně tělesa, ale jeho odstranění je z důvodu manipulace s náradím možné probušováním od vnějšího povrchu (obr. 4).

Specifika opravy svařováním

Jak už bylo zmíněno, tělesa ventilů jsou geometricky poměrně složité díly, s přechody o různých tloušťkách stěny. V samotném materiálu jsou pak obrobena další tvary, např. funkční těsnící plochy pro dosednutí těsnících elementů (obr. 3). Tyto vstupní podmínky, navíc v případě tělesa z odlitku (obr. 2), s sebou přinášejí určitá specifika zvoleného scénáře opravy svařováním. Uvedená problematika byla opakovaně úspěšně řešena u nás i ve světě propracováním ověřených opravných postupů, které využívají mimo jiné alternativní přístup k volbě přídavného materiálu a teplotě žíhání po svařování [1]. Při předchozích opravách byly bohužel vždy rostoucí trhliny beze zbytku odstraněny, aniž mohly být podrobeny podrobnější analýze o jejich původu. Představy o jejich vzniku však poskytly podklady EPRI [2].

Závěr

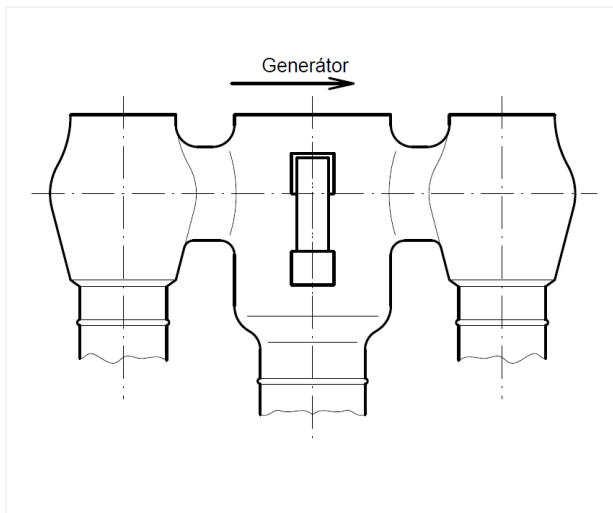
Díky dlouhodobé aktivitě odborníků ČEZ, a. s. v rámci členství v EPRI (Electric Power Research Institute) je realizován projekt vypsáný TAČR toto téma. Praktické poznatky z předchozích provedených oprav přímo v provozovnách ČEZ, a. s. jsou nyní podrobeny bližšímu zkoumání v rámci projektu národních center kompetencí (NCK). Byly odebrány vzorky z provozovaných ventilů (cca 180 000 provozních hodin), ve kterých byly obrobena svarové plochy simulující materiál, který je obvykle nutné odebrat pro úplné odstranění provozního defektu.

Technologický postup svařování byl vytvořen na základě předchozích zkušeností (tab. 3) s tímto typem oprav v podmínkách ČEZ, a. s. Parametry postupu byly podrobeny kritickému posouzení dle dokumentů EPRI, které poskytují bohatý zdroj informací [3], ze kterých bylo vycházeno při řešení problematiky.

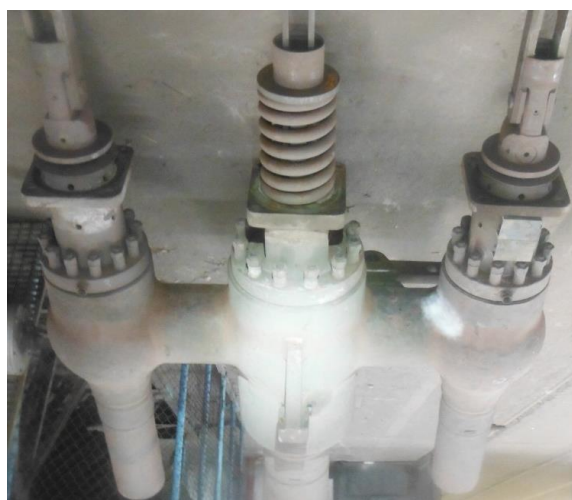
Na počátku července tohoto roku bylo provedeno ve spolupráci s kolegy z JE svařování ve středisku TARC ETE (obr. 5), které je plně vybavenou technickou základnou vhodnou pro tyto účely. Následně na vzorcích proběhly nedestruktivní zkoušky organizované VZÚ Plzeň a jejich dělení na zkušební tělíska (obr. 6). Ta budou podrobena destruktivním mechanickým zkouškám v ZČU v Plzni.

V případě osvědčení vyhovujících výsledků všech zkoušek technici ČEZ, a. s. získají technické podklady (kvalifikovaný postup), které jim pomohou rozhodovat o vhodném scénáři opravy provozovaných komponent, které téměř nikdy nemohou být po nález defektu ihned vyměněny, ale musí být spolehlivě opraveny trvale nebo dočasně, pokud tomu nasvědčuje stav komponenty s již částečně vyčerpanou životností.

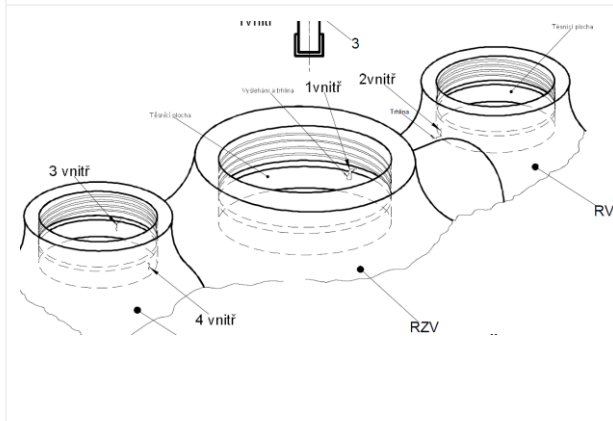
Obrázky



Obr. 1: Schéma ventilu z diagnostické zprávy



Obr. 2: Pohled na ventil uložený jako náhradní díl



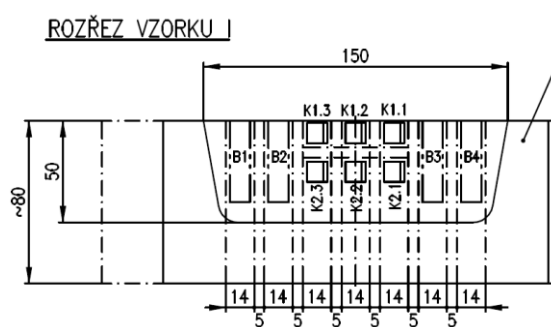
Obr. 3: schéma vad na rozebraném ventilu



Obr. 4: Odstranění defektu skrze celou stěnu ventilu



Obr. 5: TARC ETE, měření teploty interpass během svařování



Obr. 6: Schéma rozřezu vzorků pro mechanické zkoušky

Tabulky

Tab. 1: Časté CrMoV materiály použité v KE u těles ventilů, oceli na odlitky

ŠN 422747										
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Al	S	P	
0,15 0,20	0,50 0,80	0,30 0,50	1,2 1,5	0,90 1,10	0,20 0,30	max 0,60	max 0,04	max 0,030	max 0,030	
ČSN 422740										
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	W	S	P	Cu
0,11 0,19	0,60 1,00	0,20 0,50	1,00 1,50	0,40 0,60	0,50 0,70	max 0,30	0,40 0,70	max 0,030	max 0,030	max 0,30
ČSN 422744										
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P	
0,11 0,19	0,40 0,70	0,20 0,50	0,50 0,70	0,40 0,60	0,20 0,35	max 0,40	max 0,30	max 0,035	max 0,035	

Tab. 2: Některé nízkolegované CrMoV oceli na odlitky používané na tělesa ventilů v USA [4]

0.5Cr-0.5Mo-0.25V ocel+ 14MoV6-3 (EN 10216)								
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al	S	P
0,10 0,15	0,40 0,70	0,15 0,35	0,30 0,60	0,50 0,70	0,22 0,28	max 0,04	max 0,020	max 0,025
1.25Cr-1Mo-0.25V								
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al	S	P
0,15 0,20	0,50 0,80	0,30 0,50	1,00 0,50	0,90 1,15	0,20 0,30	max 0,03	max 0,030	max 0,030

Tab. 3: Některé příklady předchozích oprav

	Realizace	Zařízení	Parametry na ventilu	Materiál	Značka	Cca domnělá skupina (CR 15608)	PM použitý při opravě	Nízkoteplotní žhání během a po svaření
EPO	2014	Hlavní spouštěcí ventil	Pára, 500°C; 8,9MPa	422744	Cr-Mo-V	6.2	111/Phoenix Chromo 2 KS	„420°C“
EDE	2006	VT RZV TG 4 pravý	Pára, 550°C, 16MPa	422740	Cr-V-W-Mo	6/6.2???	111/Phoenix Chromo 2 KS	„420°C“
EDE	2016	VT RZV TG 3 pravý	Pára, 550°C, 16MPa	422740	Cr-V-W-Mo		???	„420°C“

Literatura

- [1] Brett, S. J. (2015): *Cold Weld Repair of Ferritic Components – Case Studies of UK Power Stations*. Technical report, 3002006758, EPRI, Palo Alto.
- [2] EPRI (2015): *Crack Growth and Arrest in High Temperature Valve Bodies*. Technical update, 3002006311, EPRI, Palo Alto.
- [3] Shingledecker, J., Siefert, J. (2013): *Steam Turbine Casing and Valve Body Repair Guidelines*. Technical Report, EPRI 3002001473.
- [4] Paterson, S. R., Siefert, J. A., Shingledecker, J. P. (2012): *Steam Turbine Casing and Valve Body Repair Guide. Proceedings to the EPRI International Conference on Welding and Repair Technology for Power Plants*, EPRI, Marco Island (FL, USA), paper G9.

ODVRTANÝ VZOREK Z KRITICKÉ ČÁSTI TLAKOVÉHO SYSTÉMU KOTLE A JEHO INFORMAČNÍ POTENCIÁL

THE INFORMATION POTENTIAL OF DRILLED OUT SAMPLE FROM CRITICAL AREA OF HIGH PRESSURE BOILER PART

Ladislav Horváth ^{a)}, Jakub Horváth ^{b)}, Pavel Konopík ^{c)}, Eva Chvostová ^{c)} a Martin Rund ^{c)}

^{a)} UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, 156 10 Praha – Zbraslav

^{b)} ČVUT FS, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

^{c)} COMTES FHT a.s. Průmyslová 995, 334 41 Dobřany

Abstrakt

Rozvoj metodik získávání materiálových hodnot pomocí mikrovzorků umožňuje komplexní posouzení kritického místa tlakového systému kotle ze vzorku materiálu, získaného vývrtem. Příspěvek popisuje způsob provedení odběru, získaný vzorek obsahující svarový spoj dvou ocelí a rozsah zkoušek, který vzorek této velikosti umožňuje.

Abstrakt

The development of methodologies for obtaining material values by means of micro-samples enables a comprehensive assessment of the critical area of the boiler pressure system from a sample of material obtained by drilling. The paper describes a method of taking a sample, a sample containing a welded joint of two steels and a range of tests that allows a sample of this size.

Úvod

Stále rostoucí tlak na ukončení provozu kotlů spalujících fosilní paliva bude nutit jejich provozovatele k co nejnížším investicím do výměn částí tlakového celku v době do ukončení jejich provozu a zároveň předejít haváriím, které by k nim přitáhly pozornost investigativních novinářů a ekologických hnutí. Hodnocení zbytkové životnosti u tlakových zařízení, u kterých ocelové části prošly výraznými precipitačními změnami a jsou korozně i creepově poškozené, je bez zjištění skutečných mechanických vlastností degradovaného materiálu velmi nepřesné. To může dokonce způsobit i to, že velikost odhadnuté chyby označí za dožitě i takové zařízení, které je možné ještě bezpečně provozovat po dobu v řádu měsíců nebo let. Objem materiálu potřebného pro materiálové zkoušky ovšem velmi často překračuje objem materiálu v místě špiček napětí nebo míst s lokálními extrémy teplot. Výsledky získané na klasických zkušebních tělesech tak velmi často dávají vyšší hodnoty mechanických vlastností, než jsou skutečně v kritických místech. Jedna z cest, která by mohla v této oblasti pomoci je odběr malých objemů materiálu a následné vyhodnocení materiálových vlastností prostřednictvím mikrovzorků. Zvládnutí všech činností spojených s odběrem a vyhodnocením mikrovzorků na úrovni technického servisu pro provozovatele tlakového zařízení má široký prostor využití kromě klasické energetiky u zařízení chemického a petrochemického průmyslu, kde jsou často podmínky provozu výrazně horší než u klasických kotlů na fosilní paliva. Předmětem tohoto příspěvku je popis první části posouzení, tj. popis způsobu odběru vzorku a zpracování programu jeho vyžitelnosti.

Zařízení zvolené pro experiment

Pro odběr vzorku byl zvolen kotel na spalování čpavkových par. Jedná se o zařízení, kde ve spalovací komoře reagují čpavkové páry za přítomnosti katalyzátoru se vzduchem na kysličník dusnatý a vodu. Jedná se o exotermickou reakci, při které se teplota plynu pohybuje okolo 920°C. Takto vzniklý plyn je veden do trubkového výměníku spaliny – voda. Kritickým místem je právě horní trubkovnice, resp. spoj teplosměnných trubek s trubkovnicí. V této oblasti se

jedná o složitý systém, kde hydrodynamické chování vody na spodní části trubkovnice řídí nestacionární teplotní pole jak z pohledu polohy tak i času a výkonu kotle [1], [2]. Přestože se jedná už o třetí obdobné zařízení instalované na stejném místě, nepodařilo se uspokojivě tento kritický uzel, který určuje zbytkovou životnost prakticky celého kotle, vyřešit. Jedním z důvodů je i nedostatek dat o degradačních změnách oceli v této oblasti. Trubkovnice je z materiálu 1.7335. Teplosměnné trubky jsou z materiálu 1.5415. Detail kritického místa je na obr. 1, charakteristická indikace vady na obr. 2. Modelování procesů pod trubkovnicí na obr. 3.

Zvolený způsob odběru vzorku

Omezující podmínky pro odběr vzorku z kritického místa (nutnost bezpečného uzavření vzniklého otvoru, nepoškození okolních částí, garance tepelného neovlivnění okolí, garance silového neovlivnění okolí) vedly k volbě odvrtání vzorku korunovým vrtákem, odbroušení teplosměnné trubky pod trubkovnicí, její zaslepení u protilehlé trubkovnice a zakolíkování a zavaření otvoru v horní trubkovnici po odebraném vzorku. Po dohodě se specializovanou firmou, která měla vrtání provádět, bylo touto firmou navrženo provést uchycení základu vrtací soupravy k horní části trubkovnice pomocí elektromagnetu, který je součástí soupravy. Trubkovnice je feromagnetická z ocele 1.7335. Vnější průměr vrtáku je dán omezením, podle kterého musí zůstat dostatečná zbytková tloušťka materiálu trubkovnice u okolních vývrtů pro teplosměnné trubky tak, aby bylo možno vzniklý otvor následně zaslepit a zavařit. Svařovací postup pro zaslepení byl schválen výrobcem kotle. Teplota během celého odběru byla měřena dvěma termočlánky typu K, z nichž jeden byl napojen na digitální teploměr a druhý na datalogger (obr. 4).

Velikost vzorku a jeho využití

Odvrtáním vznikne vzorek o rozměrech uvedených na obr. 5. Vzhledem k probíhajícímu reklamačnímu řízení bylo rozhodnuto odvrtaný vzorek rozříznout na dvě poloviny ve směru jeho podélné osy. Jednu polovinu uložit jako svědečný vzorek pro případ zpochybnění výsledků získaných kontrolami provedenými na druhé polovině. Pro polovinu, která byla uvolněna pro materiálové zkoušky byl vytvořen návrh rozřezového plánu a stanovení počtu a typu zkušebních těles, které je možné z odvrtaného objemu vyrobit.

Charakteristiky, které je možné získat vyhodnocením vzorků

Tahové vlastnosti ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , A , Z) – zelené vzorky

Základem jsou mikro-tahové vzorky (M-TT) [3], které umožňují popsat rozložení materiálových vlastností jak trubkovnice, tak teplosměnné trubky a díky tloušťce 0,5 mm je možná jejich orientace i napříč tloušťkou stěny. Výhodou pak je jednoznačné určení základních charakteristik (mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , plastické prodloužení při maximálním zatížení A_g , tažnost A a kontrakce Z) bez nutnosti jakýchkoliv korelačních vztahů (za předpokladu přesného měření síly a deformace opticky pomocí DIC – Digital Image Correlation). Rozměr odvrtaného tělesa dovoluje umístění v podélném a tečném směru. Díky malé velikosti M-TT vzorku lze uvažovat i o umístění a měření vlastností svaru a TOO.

Vrubová houževnatost (resp. KV, FATT) – modré vzorky

Pro vyhodnocení rázové energie (KV), případně vrubové houževnatosti (KCV) a přechodové teploty FATT [4, 5] lze použít miniaturizovaná tělesa pro třibodový ohyb (4x3x27 mm), známé jako mini-Charpy, příp. tzv. KLST (Kleineprobe). Zde je nutné počítat s posunem chování při přechodu z houževnaté do křehké oblasti, které je ale možno s velkou pravděpodobností predikovat.

Lomová houževnatost (K, J, CTOD) – červené

Parametry lomové houževnatosti (K, J, CTOD) [6] lze měřit tělesy KLST s únavovou trhlinou, případně miniaturizovanými CT tělesy. Zde je dle charakteru šíření trhliny (štěpné, tvárné, přechodové) nutné vhodně interpretovat získané vlastnosti ve vztahu ke standardním tělesům. Variantně by bylo možné uvažovat i o popsání závislosti mezi přírůstkem únavové trhliny v tělese (da) pro určitý přírůstek cyklů (dN) jakožto funkci rozkmitu faktoru intenzity napětí (delta K). Pro tyto zkoušky (tj. zkoušky šíření únavové trhliny) se používají miniaturizovaná CT tělesa. Tato měření se nyní nachází ve finální fázi vývoje.

Únava (mez únavy, Wöhlerova křivka, Manson-Coffinova křivka) – fialová

Miniaturizovaná tělesa pro VCÚ (vysokocyklová únava) jsou v rozřezovém plánu a pro NCÚ (nizkokyklová únava) se používají obdobná, ale s paralelní délkou tělíčka [7]. Metodika zkoušení se neliší od standardních zkoušek, ale je nutné mít správně navržený měřicí řetězec (vhodné uchycení, souosost, pro NCÚ měření deformace pomocí DIC).

Korozní hodnocení a analýza seškrabů

Vyhodnocení také předpokládalo posouzení korozního napadení na úrovni mikroskopie a provedení RTG strukturních analýz seškrabů, materiálů trubkovnice, trubky a svaru.

Metalografické hodnocení a měření mikrotvrdostí

V rámci vyhodnocení vzorku se předpokládalo i metalografické (světelná i elektronová) vyhodnocení strukturního stavu a popis svarového spoje včetně měření mikrotvrdostí přes svarový spoj.

Závěr

Byl připraven a technicky zajištěn poměrně široký soubor experimentálního zjištění materiálových charakteristik a stavu korozního poškození. V současné době probíhá diskuse s výrobcem kotle, na základě které, může ještě dojít ke změnám navrženého rozsahu zkoušek. Základním sdělením tohoto příspěvku je informace o tom, že odběr materiálu pro výrobu mikrovzorků i následné zkoušky se posunuly z oblasti výzkumu do kategorie servisních činností pro provozovatele zařízení.

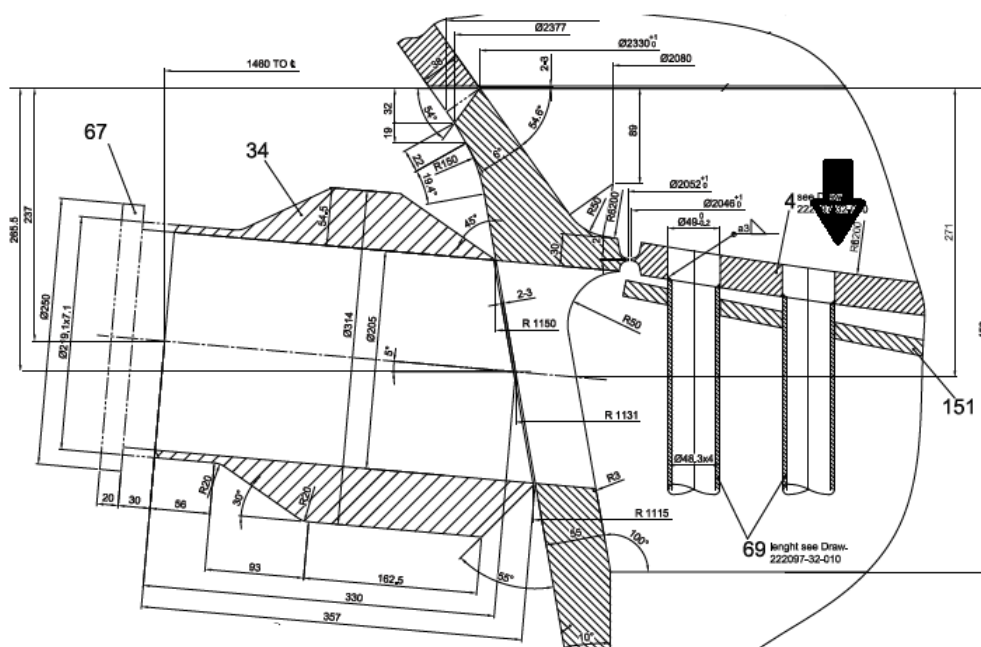
Poděkování

Práce byly řešeny s finanční podporou MPO, Projekt FV40166 „Hodnocení degradovaných ocelí pro stavbu turbín a přehřívačů elektrárenských kotlů pro potřebu predikce zbytkové životnosti a lokálních oprav“.

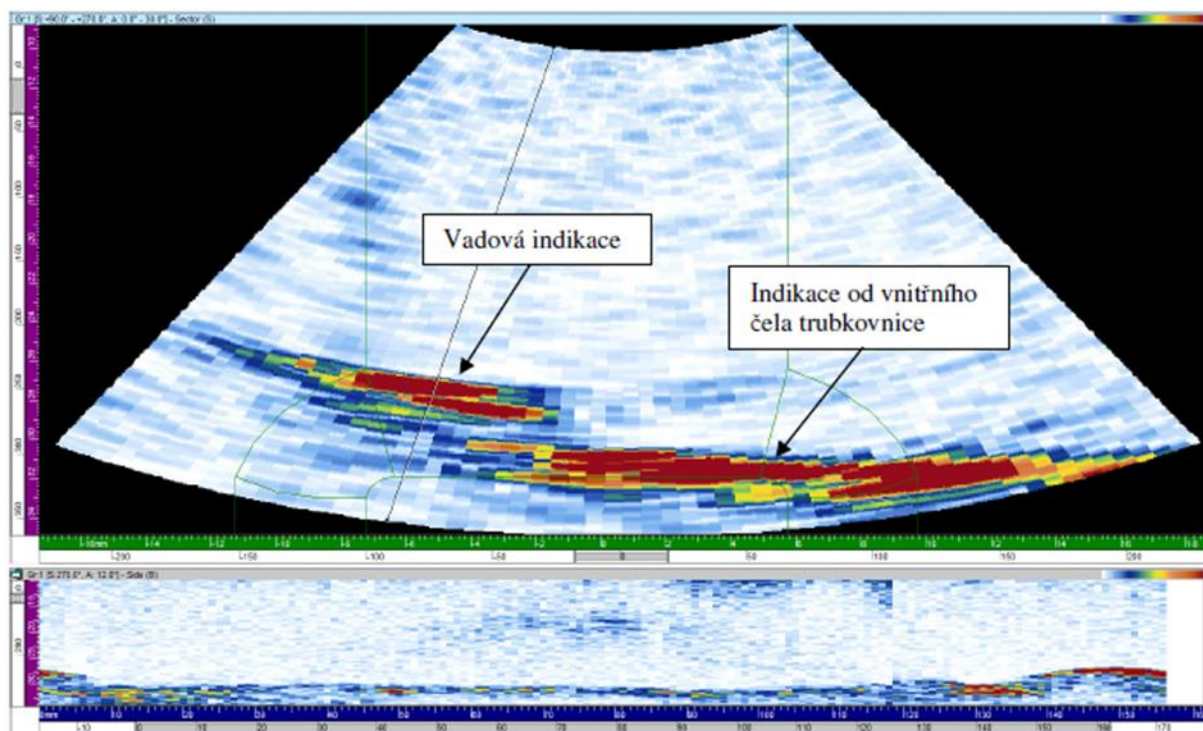
Literatura

- [1] Hrivňák, I. (26. 2. 2002): *Materiálový rozbor teplovýmenej rúrky z vyvíjača pary KD3, kotol 107*. Technický dopis Katedry materiálového inžinierstva Materiálovotechnickej fakulty STU, Trnava.
- [2] Horváth, J., Horváth, L. (2019): *Podklady pro zadání soudně znaleckého posudku na zjištění příčiny vzniku netěsností mezi trubkovnicí a trubkami výměníku E3204 kotle KD6*. Zpráva, 1012-S771-19.3.2019, VAMET, s.r.o., Praha.
- [3] Džugan, J., Procházka, R., Konopík, P. (2015): *Micro-tensile test technique development and application to mechanical property determination*. STP1576-EB Small Specimen Test Techniques: 6th Volume, pp. 12-30.
- [4] Konopík, P., Džugan, J., Procházka, R. (2013): *Evaluation of local mechanical properties of steel weld by miniature testing technique*. Materials Science and Technology Conference & Exhibition 2013, Vol. 4, pp. 2404-2411. ISBN 978-0-87339-762-9
- [5] Konopík, P., Džugan, J., Bucki, T., Rzepa, S., Rund, M., Procházka, R. (2017): *Correlation between standard Charpy and sub-size Charpy test results of selected steels*

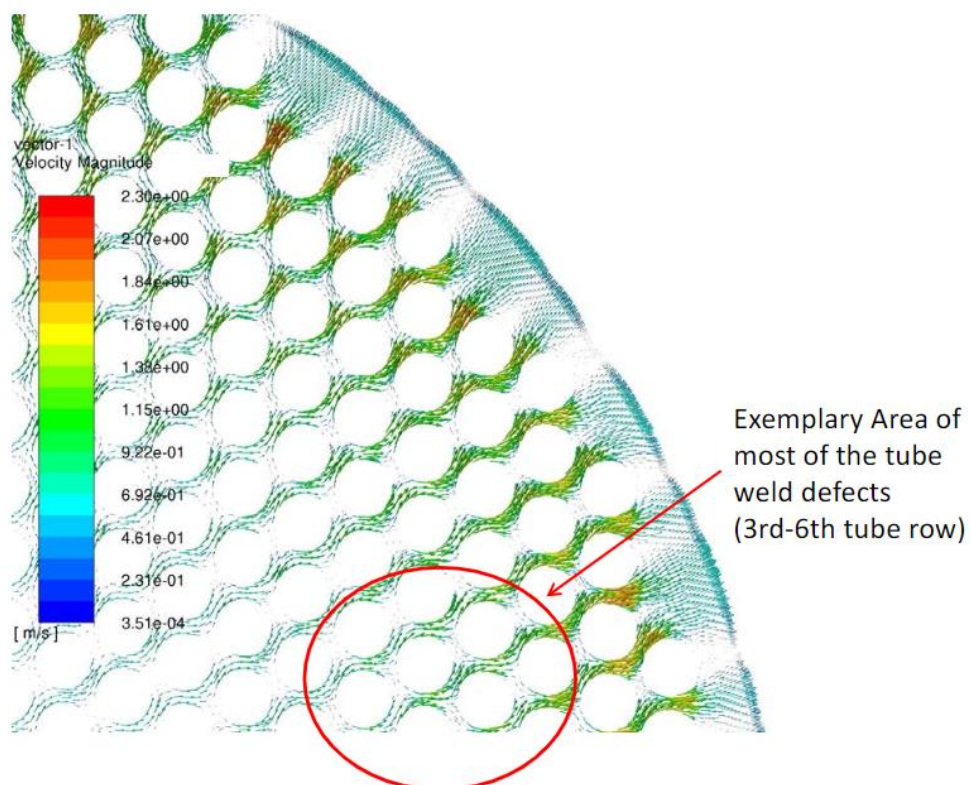
- [6] Konopik, P., Dzugan, J., Rund, M. (2015): Determination of Fracture Toughness in the Upper Shelf Region Using Small Sample Test Techniques. *Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2015*, TANGER Ltd., Brno, CD-ROM. ISBN 978-80-87294-58-1
- [7] Prochazka, R., Dzugan, J., Konopik, P., Rund, M. (2017): Investigation of High Strength Stainless Steel Using Small Specimen Test Techniques – Tensile and Fatigue Properties. *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design M2D2017*, FEUP-INEGI, Albufeira (Portugal), USB flash drive (pp. 191-202). ISBN 978-989-98832-7-7
- [8] Steuten, B., Vogt, A. (2019): *Report CFD Investigation*, Document, 222096A-70-001-DB590, ARVOS GmbH Germany.



Obr. 1: Detail kritického místa



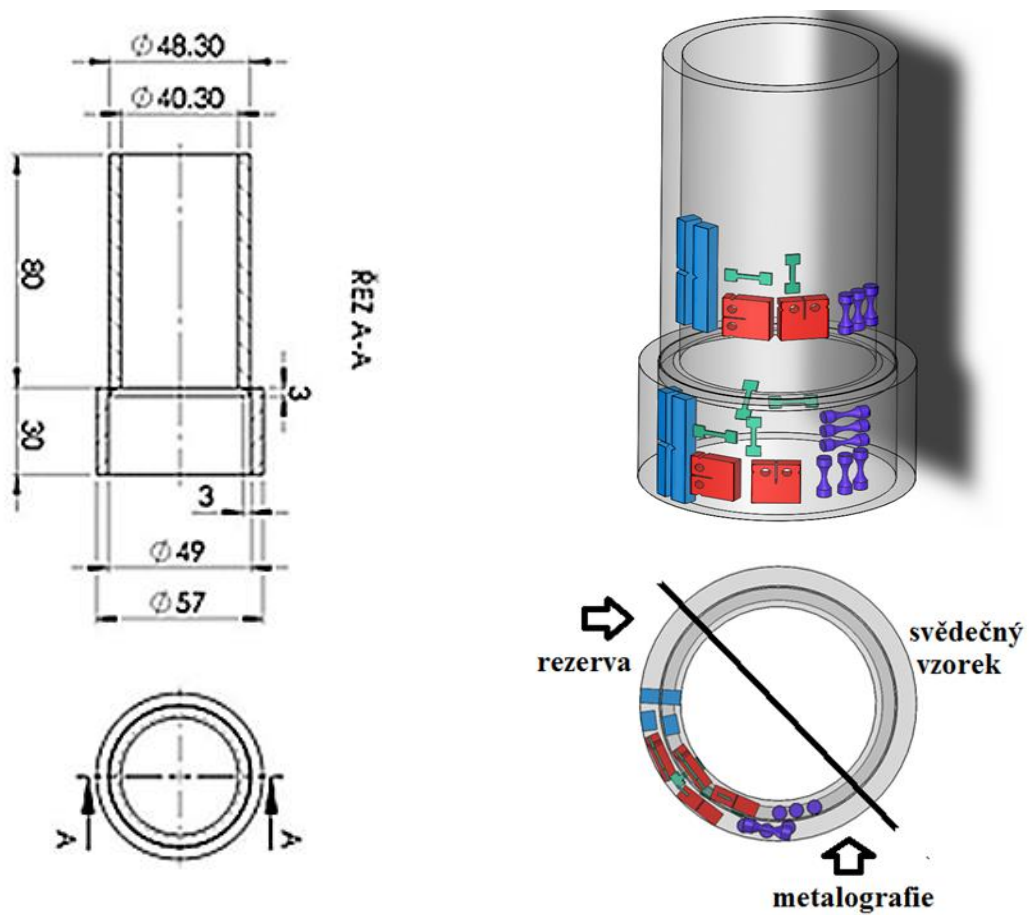
Obr. 2: Phased Array kontrola svarů teplosměnných trubek s trubkovnicí s vyznačením vadové indikace



Obr. 3: Modelování rychlostního pole pod trubkovnicí [8]



Obr. 4: Vyznačená plocha vývrtu, použitý vrták a místo vývrtu osazené termočlánky



Obr. 5: Vytěžitelnost získaného objemu materiálu

HODNOCENÍ VLIVU TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ NA MIKROSTRUKTURNÍ VLASTNOSTI ŽÁROPEVNÉ NIKLOVÉ SLITINY

INFLUENCE OF THE MACHINING TO THE MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF CREEP RESISTANT NICKEL BASED SUPERALLOY

Marie Rohlová ^{a)}, Michal Slaný ^{b)} a Jakub Horváth ^{a)}

^{a)} ČVUT v Praze, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2

^{b)} ČVUT v Praze, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, Technická 4, 166 07 Praha 6

Abstrakt

Strojní součásti vyráběné ze žárovevných niklových slitin určených pro vysokoteplotní aplikace musí již z principu aplikace odolávat náročným pracovním podmínkám. Volba technologie výroby dílů má výrazný vliv na výsledné funkční vlastnosti a měla by být nezanedbatelnou součástí správného návrhu součásti. Třískové obrábění je stále nutnou součástí výroby tvarově složitých dílů s vysokou tvarovou a rozměrovou přesností. Dokončovací operace obrábění se mohou podepsat na životnosti dílů. Nevhodnou technologií může dojít ke snížení únavových mezí, ze kterých návrh vychází. Obrábění může mít vliv na změnu povrchové vrstvy například změnou tvrdosti, vznikem napětí nebo změnou chemického složení, přechodem prvků mezi obrobkem a nástrojem. Cílem článku je popis mikrostrukturních změn v důsledku třískového obrábění a následné ovlivnění niklové slitiny pro mechanické zkoušky či přímou aplikaci do provozu.

Abstract

Machine parts made of creep-resistant nickel alloys designed for high-temperature applications must, by virtue of their application principle, withstand demanding working conditions. The choice of component manufacturing technology has a significant effect on the resulting functional properties and should be a significant part of the correct design of the part. Machining is still a necessary part of the production of complex shaped parts with high dimensional accuracy. Finishing operations can affect the life of parts. Improper technology can reduce the fatigue limits on which the design is based. Machining can cause the change of the surface layer, for example by changing the hardness, induce stress or changing the chemical composition, the transition of elements between the workpiece and the tool. The aim of the paper is to describe microstructural changes due to machining and subsequent influence of nickel alloy for mechanical tests or direct application into operation.

Úvod

Niklové superslitiny jsou nepostradatelné materiály umožňující výrobu vysokoteplotně namáhaných dílů do leteckého nebo energetického průmyslu. I při relativně vysokých teplotách se vyznačují vysokou pevností, rozměrovou stálostí a odolností vůči korozi. Dle způsobu výroby lze tyto superslitiny dělit na tvářené a lité. U obou skupin je potřeba pro některé aplikace či zkoušky slitiny třískově obrábět. Špatným třískovým obráběním může být způsobeno nežádoucí ovlivnění struktury těchto slitin, které následně může zkreslovat měření u zkoušek anebo nepříznivě ovlivnit životnost dílů v provozu. Tento příspěvek se zabývá litou niklovou polykrytalickou superslitinou Inconel 713LC (low carbon). Vzhledem k obtížné obrobitelnosti této slitiny se odlévá metodou přesného lité s minimálními přídavky na opracování. Obrábění je však u těchto slitin potřeba pro kontrolní vzorky na mechanické zkoušky.

Experimentální část

Inconel 713LC použitý pro experiment byl z jedné tavby s obsahem měřitelných chemických prvků uvedených v tab. 1. Chemické složení bylo měřeno rentgeno-fluorescencí spektrometrem InnovXsystems DELTA.

Struktura Inconelu 713LC je ve výchozím stavu tvořena tuhým roztokem γ , s jemně disperzní vytvrzující fází γ' . Dále jsou ve struktuře pozorovatelné nepravidelně vyloučené primární případně sekundární karbidy typu MC a malé množství eutektika γ'/γ , kde fáze γ' může dosahovat až velikosti několika desítek μm . Ve výchozím stavu je charakteristická kuboidální morfologie fáze γ' . [1]

Parametry experimentu

Pro experiment byla jako měnící se parametr třískového obrábění zvolena řezná rychlost. Jednotlivé označení vzorků je uvedeno v tab. 2.

Pozorování vzorků bylo provedeno na řádkovacím elektronovém mikroskopu JEOL 7600F.

Vzorek 1.1 a 1.2

Na obr. 1 a obr. 3 byly pozorovány drobné změny pod obrobeným povrchem. Došlo zde k nepatrnému spojování a hrubnutí vytvrzující fáze γ' jak u vzorku 1.1, tak u vzorku 1.2. Nedošlo zde však ještě ke specifickému vytváření souvislé vrstvy karbidů na hranicích zrn ani k šíření trhlin viz obr. 2 a obr. 4.

Vzorek 2.1 a 2.2

U vzorků 2.1 a 2.2 byla patrná tvorba karbidů po hranicích zrn viz obr. 5 a obr. 7. U obou vzorků došlo k významnému spojování a hrubnutí vytvrzující fáze γ' patrné na obr. 6 a obr. 8.

Vzorek 3.1 a 3.2

Vzorky 3.1 a 3.2 již vykazovaly známky tepelně a mechanicky ovlivněného povrchu. Došlo ke slučování karbidů po hranicích zrn (obr. 9 a obr. 11) a ke slučování a hrubnutí vytvrzující fáze γ' (obr. 10 a obr. 12). Dále zde také došlo k iniciaci a šíření trhlin v místě karbidů, což je patrné na obr. 10 a obr. 12.

Diskuse

Cílem experimentu bylo zhodnocení a určení možné vnesené chyby do následných kontrolních vzorků pro mechanické zkoušení či následnou aplikaci do provozu. Pro experiment byl zvolený měnící se parametr třískového obrábění, a to řezná rychlost.

U prvních dvou vzorků (1.1 a 1.2) s nejnižšími řeznými rychlostmi (11 a 17 m/min) došlo pouze k ovlivnění disperzní vytvrzující fáze γ' , kde začalo docházet k jejímu nepatrnému slučování a hrubnutí do hloubky přibližně 30 μm . U vzorků 2.2 a 3.2 byla řezná rychlost (27 a 41 m/min). U vzorků již začalo docházet ke slučování a hrubnutí vytvrzující fáze γ' a zároveň k tvorbě karbidů na hranicích zrn, a to až do hloubky okolo 50 μm . U posledních dvou vzorků (3.1 a 3.2) byly dané řezné rychlosti 64 a 100 m/min. Docházelo zde k významnému spojování a hrubnutí vytvrzující fáze γ' a k tvorbě karbidů po hranicích zrn. Pod povrchem obou vzorků na karbidech byly nalezeny iniciace trhlin.

Z daných experimentů lze usoudit, že třískové obrábění IN713LC i při nízkých řezných rychlostech již vnáší chybu do materiálu ať pouze teplotním ovlivněním nebo kombinací teplotního a mechanického ovlivnění. Pro následné zkoušky je nutné tuto chybu eliminovat. Při nízkých rychlostech je z experimentu patrné, že došlo k ovlivnění vzorků pouze teplotně nikoliv mechanicky. IN713LC je tedy možné obrábět nízkými řeznými rychlostmi s dostatečným chlazením. Pro stanovení přesné hraniční hodnoty řezných rychlostí by bylo nutné provést zkoušky v rozmezí řezných rychlostí 41-64 m/min. Pro provedený experiment je však horní mezní hodnotou přípustné řezné rychlosti 41 m/min s podmínkou dostatečného chlazení.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl na základě výsledků získaných za podpory grantové agentury Českého vysokého učení technického v Praze v rámci projektu číslo SGS19/162/OHK2/3T/12.

Literatura

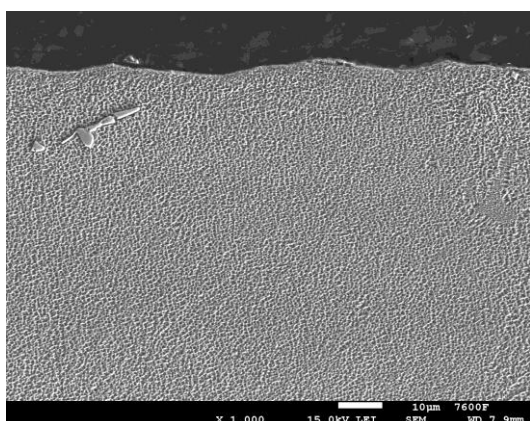
- [1] Podrábský, T. (2005): *Vliv podmínek zatěžování na strukturu a porušování lité niklové superslitiny*. Vědecké spisy vysokého učení technického v Brně, Sv. 81. ISSN 1213-418X
- [2] Juliš, M. (2008): *Nízkocyklová únava vybraných niklových superslitin za vysokých teplot*. Disertační práce, ÚMVI, FSI VUT v Brně, Brno.

Tab. 1: Chemické prvky obsahující Inconel 713LC měřitelné rentgeno-fluorescenčním spektrometrem InnovXsystems DELTA v hm. %

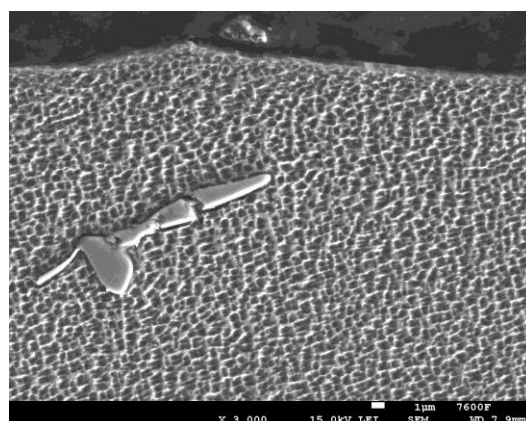
Prvek	Ni	Al	Ti	Cr	Zr	Fe
Měřená hodnota [%]	Základ	5,15	0,75	11,63	0,091	0,18
Směrodatná odchylka [%]		±0,22	±0,04	±0,08	±0,004	±0,01
Přípustné rozmezí [%] [2]		5,50-6,50	0,40-1,00	11,00-13,00	0,05-0,15	<0,5

Tab. 2: Rozdělení a označení vzorků dle měnícího se parametru

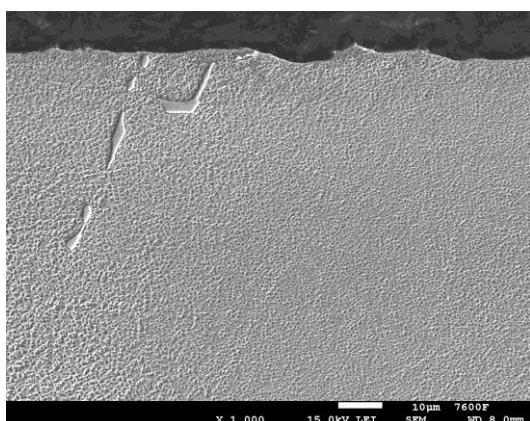
Rezná rychlost [m/min]	11	17	27	41	64	100
Označení vzorku	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2



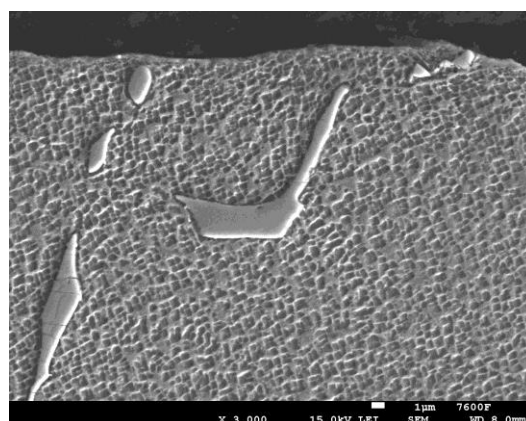
Obr. 1: Vzorek 1.1



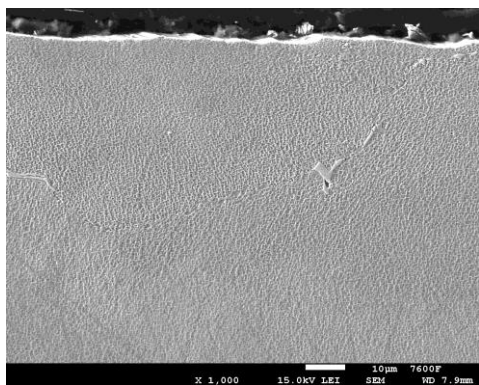
Obr. 2: Vzorek 1.1, detail



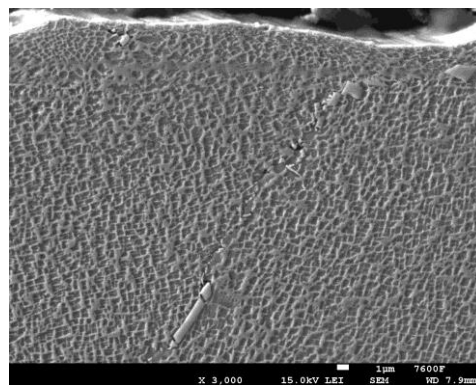
Obr. 3: Vzorek 1.2



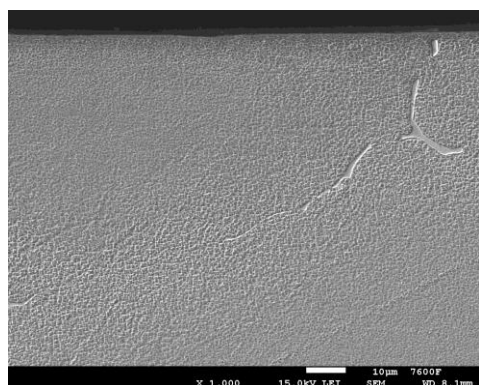
Obr. 4: Vzorek 1.2, detail



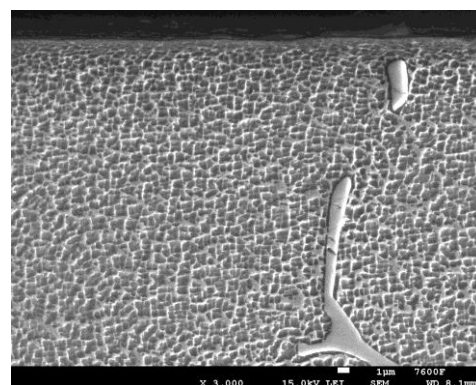
Obr. 5: Vzorek 2.1



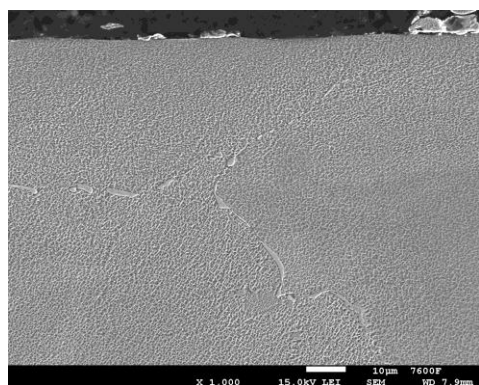
Obr. 6: Vzorek 2.1, detail



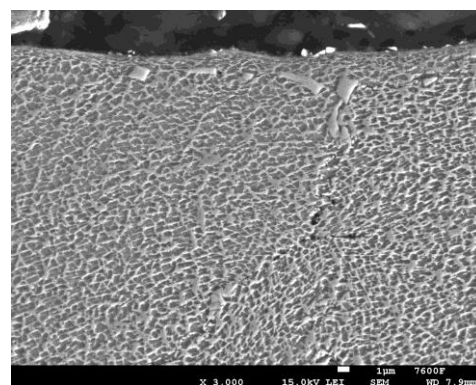
Obr. 7: Vzorek 2.2



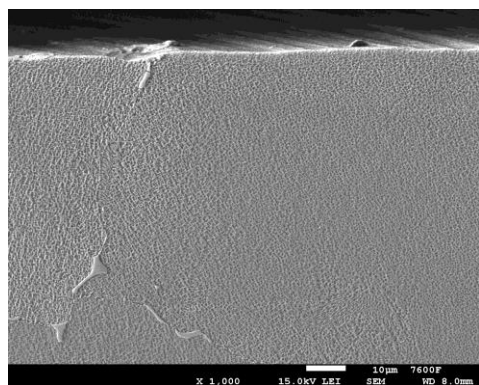
Obr. 8: Vzorek 2.2, detail



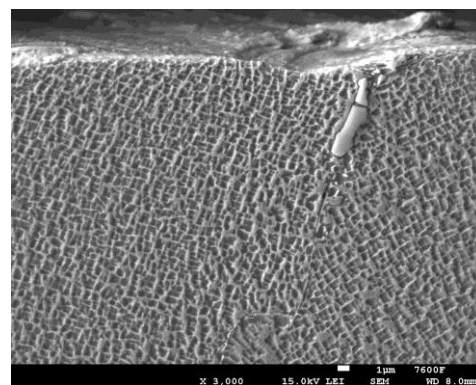
Obr. 9: Vzorek 3.1



Obr. 10: Vzorek 3.1, detail



Obr. 11: Vzorek 3.2



Obr. 12: Vzorek 3.2, detail

JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ V PRAXI: REKONSTRUKCE ROZVODU NAPÁJECÍ VODY PAROGENERÁTORŮ TYPU VVER 440/1000 NA JE DUKOVANY/TEMELÍN

NUCLEAR REPAIR ENGINEERING IN PRACTISE: RECONSTRUCTION OF FEED WATER PIPING OF STEAM GENERATORS OF WWER TYPE 440/1000 IN DUKOVANY AND TEMELIN NPP

Tomáš Soukup

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Konstrukční řešení rozvodu napájecí vody (NV) parogenerátorů VVER 440/1000 v sobě obsahuje heterogenní svarové spoje mezi nelegovanou ušlechtilou ocelí a austenitickou korozivzdornou ocelí. Jejich omezená životnost způsobená zejména mechanismem korozního praskání pod napětím vedla k nutnosti přípravy a realizace oprav tohoto typu spoje. V případě JE Dukovany byla navržena projektová změna spočívající v náhradě svarového spoje přírubovým, v případě JE Temelín byl rozvod uveden do původního projektového stavu nahrazením svařených potrubních dílů. V obou případech byly použity při opravě unikátní technologie. V případě VVER 1000 svařování pulzním procesem TIG, u VVER 440 svařování metodou MAG, nové počítačové technologie simulací a 3D virtuální reality.

Abstract

Design of feed water piping of steam generators WWER 440/1000 consists of dissimilar metal welds (DMW) of unalloyed carbon steel and austenitic stainless steel. Limited lifetime of those welds caused by stress corrosion cracking leads to the necessity of weld joint repair. There was proposed the design modification in the Dukovany NPP to replace DMW by flange joint. In Temelin NPP the DMW joint was replaced by new inserted section of feed water piping including DMW joint. Unique technologies were used in both cases. In WWER 1000 use of orbital automatic pulsed TIG welding, in WWER 440 use of manual pulsed MAG welding, numerical simulations and 3D virtual reality were used in both cases.

Rozvod napájecí vody PG 440 JE Dukovany

Parogenerátor (PG) představuje tlakovou nádobu s výměníkem. Celý vnitřní prostor na sekundární straně je naplněn vodou, která se doplňuje pomocí potrubí z nelegované konstrukční uhlíkové oceli procházejícího stěnou PG. Dále uvnitř PG je toto potrubí rozbočeno. Před rozbočením se nachází heterogenní svarový spoj přechodu konstrukční ušlechtilé uhlíkové oceli na austenitickou korozivzdornou ocel, jak ukazuje obr. 1.

Původní konstrukční řešení bylo provedeno heterogenním svarovým spojem navrženým a provedeným dle předpisů OP 1513-72 svařovacím materiálem Sv-10Ch16N25AM6 metodou TIG/141 v kombinaci s obalenou elektrodou EA 395/9.

Provedení opravy výrobou nového přechodového svařovaného „mezikusu“ a jeho přivaření na původní místo metodou TIG/141 je časově náročné řešení, které není možné z důvodu vysoké radiační zátěže na místě. Vložení nového přechodového kusu by představovalo provedení dvou tupých svarů na trubce DN 250, jeden svar na materiálu austenitické korozivzdorné oceli a jeden svar na ušlechtilé nelegované oceli.

Bylo navrženo řešení, které eliminuje konstrukčně technologické nevýhody heterogenního svarového spoje a zejména jeho chování (degradaci) za provozu. Část potrubí s přechodovým

kusem obsahujícím heterogenní svarový spoj, se odstranila a nahradila přírubovým spojem, jak ukazuje obr. 2.

Volba metody svařování

Z důvodu minimalizovat čas svařování v nepříznivých radiačních podmínkách byla po hlubší rozvaze stavu moderních metod svařování zvolena technologie MAG/135 („metal active gas“) s použitím vhodných přídavných svařovacích materiálů. Tato metoda až dosud nebyla v podmínkách čs. projektu VVER na tlakových dílech použita. To představuje nutnost tzv. atestace jak vlastní technologie svařování, tak vhodných přídavných materiálů dle vypracovaného atestačního programu.

Tato metoda svařování realizovaná moderními svařovacími invertorovými zdroji umožňuje použití procesu přenosu kovu v pulzním režimu. Technologie pulzního procesu MAG dosahuje vysoké produktivity ve srovnání s metodou TIG. Dále se vyznačuje velmi nízkým rozstříkáním a malým propalem legur, vysokou ovladatelností v polohách.

Technologie je ve světě již delší dobu používána v běžném průmyslu tlakových nádob a potrubí dálkovodů, případně v kombinaci s trubičkovým plněným drátem. Byl tak velký předpoklad, že tato technologie splní požadavky na rekonstrukci uzlu NV PG EDU.

Atestace

Byl zpracován program atestace a provedena řada technologických zkoušek svařovacími materiály pro metodu MAG značek EMK 6 a Inertfil 316LSi a po zvládnutí svařovacích parametrů na nejmodernějším pulzním svařovacím zdroji, byly provedeny atestační zkoušky svařovacích materiálů a zkoušky postupu svařování.

Výsledky zkoušek při atestaci drátů byly porovnány s výsledky dosaženými při použití metody 141 těmi samými svařovacími materiály. Výsledky ukázaly že v případě metody 135 lze dosáhnout dokonce vyšších mechanických hodnot svarového kovu.

Požadovaný rozsah, metody a kritéria zkoušek atestace svařovacího drátu EMK 6 např. byly:

- Mechanické hodnoty musí být v souladu se specifikací.
- Zkouška tahem při 20 °C, 350 °C v souladu s ISO 5178 a EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, analyzuje se R_m , $R_{p0,2}$, A_5 , Z .
- Zkouška rázem v ohybu v souladu s EN ISO 148-1 a EN ISO 9016, analyzuje se KV při +20 °C.
- Potvrzení kritické teploty křehkosti $T_k \leq 0$ °C ověřením na zkušebních vzorcích zkoušených dle metodiky EN ISO 9016 na základě vyhodnocení KV anebo KCV při -10 a +20 °C a podílu houževnatého lomu minimálně na třech zkušebních tyčích při každé zkušební teplotě dle metodiky v příloze č. 2 PNAEG-7-002-86.

Nedílnou a časově náročnou částí byl nezbytný výcvik svářečů. a následně zajištění jejich kvalifikací dle platných technických norem. Výcvik byl prováděn pod odborným vedením technologů ŠKODA JS a.s. v dílenských podmínkách, ale simulujícím stísněném prostoru uvnitř PG (viz obr. 3). Nejdříve si svářeči osvojovali pulzní metodu svařování na koutových svarových spojkách z plechu, následně se přistoupilo na svarové spoje trubka/plech. Vlastní zkouška probíhala na svarovém spoji, který se podobal reálnému konstrukčnímu řešení, tj. byl to spoj trubka – příruba. Odborná příprava svářečů a zajištění zkušebních vzorků představuje obrovské ekonomické náklady, přesto je v takovýchto případech nezbytná.

Rozvod napájecí vody PG 1000 JE Temelín

V případě NV PG na JE Temelín byl původní úsek rozvodu nahrazen novým, jak ukazuje obr. 4. Šrafovaná část byla vyměněna. Vodorovný úsek představuje vložený přechodový hete-

rogenní svarový spoj mezi ruskou ocelí St 20 a 08Ch18N10T. Konstrukční řešení svarového spoje je s tzv. „předběžným návarem“ („přechodovým návarem“). Materiál návaru byl zvolen Sv 07Ch25N13 průměr 1,0 mm. Vlastní svarový spoj byl proveden drátem Sv 04Ch19N11M3 průměr 0,8 mm.

Volba metody svařování

Pro zajištění maximální možné kvality a současně vysoké produktivity nutné pro výrobu 4 kusů přechodových dílů z trubek o rozměru 418x24 mm byla zvolena varianta orbitálního automatického svařování metodou 141. K dispozici byl standardní orbitální automat na DN 250, který pro výrobu přechodových kusů byl přestavěn a v řádu několika dní přestavěn pro výrobu jak zkušebních kusů, tak výrobu dílů k opravě. Automat v konstrukční úpravě specialistů ŠKODA JS byl upraven na dvě konfigurace: pro navařování předběžného návaru v poloze PA a pro provedení vlastního svaru v poloze PC (viz obr. 5 a obr. 6). Před vlastní výrobou bylo nutné provést zkoušku postupu svařování na dostatečně reprezentativním vzorku. Nakonec byl zajištěn a použit rozměr trubky pro kvalifikaci postupu svařování Ø324x18 mm.

Zkušenosti

Osvojení výroby představuje poměrně náročný proces, který byl zvládnut díky předchozím zkušenostem při nasazení orbitálního svařování na výměně zpětné klapky na odbočce primárního potrubí JE Dukovany. U takto důležitých komponent je dobrým zvykem provést předvýrobní zkoušky, dříve nazývané osvojení výroby. Dobré zvládnutí úkolu bylo podmíněno předchozími zkušenostmi a rozsáhlými výrobními zkouškami. Celá akce probíhala v nesmírně napnutém harmonogramu.

Použití 3D virtuální reality v opravárenství

V případě rekonstrukcí rozvodů napájecí vody JE Temelín byl po delší době osvojování využit nový nástroj v podobě virtuální reality (VR). Virtuální realita byla použita nejdříve pro ověření navrženého postupu opravy. Technik mohl provést „prohlídku“ prostoru a udělat si o něm představu, zda je možné provést zamýšlené manipulace a polohování. V následné fázi byl přizván svářeč, technolog, který ve VR odzkoušel navržené polohy při svařování a mohl si i popřípadě navrhnout i jinou polohu. V závěrečné fázi byli přizváni všichni pracovníci, kteří prováděli opravu v PG a mohli se seznámit s prostředím ve kterém budou pracovat a vyzkoušet si navržený postup práce.

V závislosti na kladném ohlasu jsem se rozhodl použít VR i na JE Dukovany. Byli přizváni všichni pracovníci, kteří prováděli opravu v PG a mohli se seznámit opět s prostředím ve kterém budou pracovat a vyzkoušet si navržený postup práce.

Závěr

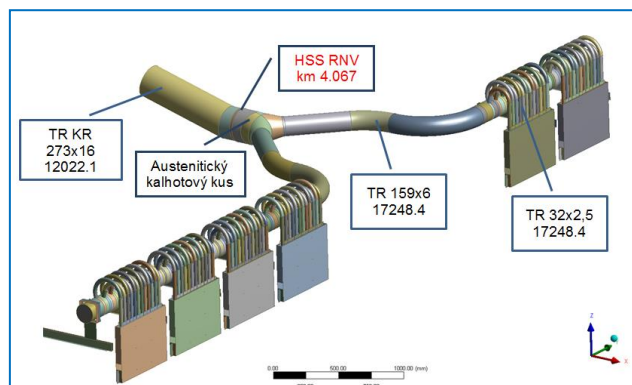
V případě rekonstrukce rozvodů napájecí vody PG na JE Dukovany a Temelín bylo nastíněno, jak důležité je osvojování a využívání nových technologií v oblasti jaderného opravárenství a při výrobě komponent a náhradních dílů. Osvojování těchto technologií je ekonomicky náročné a současně vyžaduje vysoce odborný a kvalifikovaný personál na všech úrovních, od zkušených a znalých montérů/zámečníků/potrubářů přes personál technologů po zkušené projektanty, konstruktéry a vedoucí.

Osvojování nových technologií vyžaduje komplexní znalosti napříč různými obory a ochotu nové technologie si osvojit a používat. Jako většina náročných oprav v JE je dobrý výsledek podmíněn mezidisciplinární spoluprací všech členů týmu podílejících se na opravě.

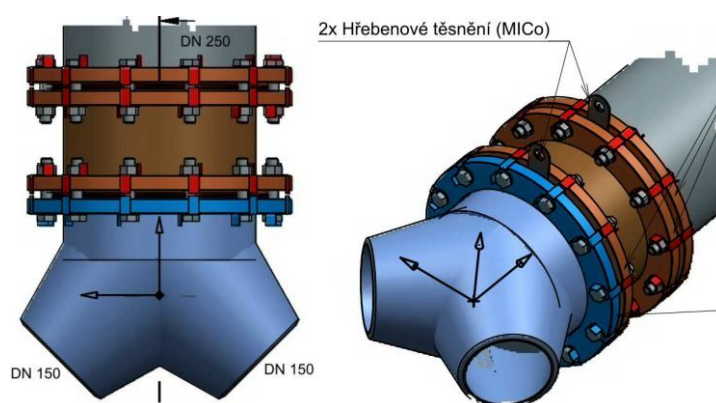
V případě použití metody MAG byla použita technologie pulzu s velmi dobrými výsledky a je připravována na použití při rekonstrukcích těsnících ploch z austenitické korozivzdorné oceli výměníků v nejaderné části JE Dukovany. S ohledem na nutný konzervativní přístup v JE je však každé další využití na konkrétní aplikaci nutné velmi pečlivě zvážit a atestovat.

Při výrobě přechodových kusů orbitálním automatem byly získány cenné zkušenosti s výrobou přechodových návarů metodou, která je dnes výrazně zastoupena při výrobě nových komponent JE ve světě.

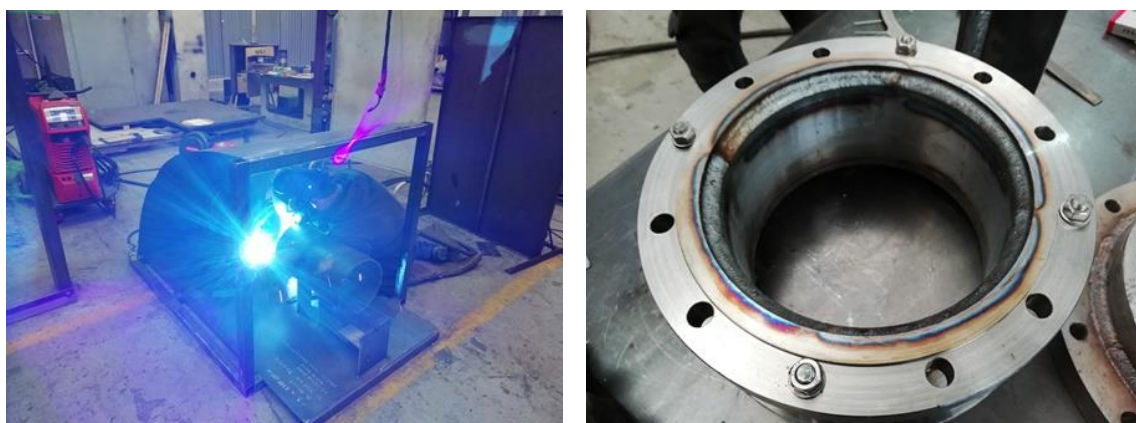
Obrázky



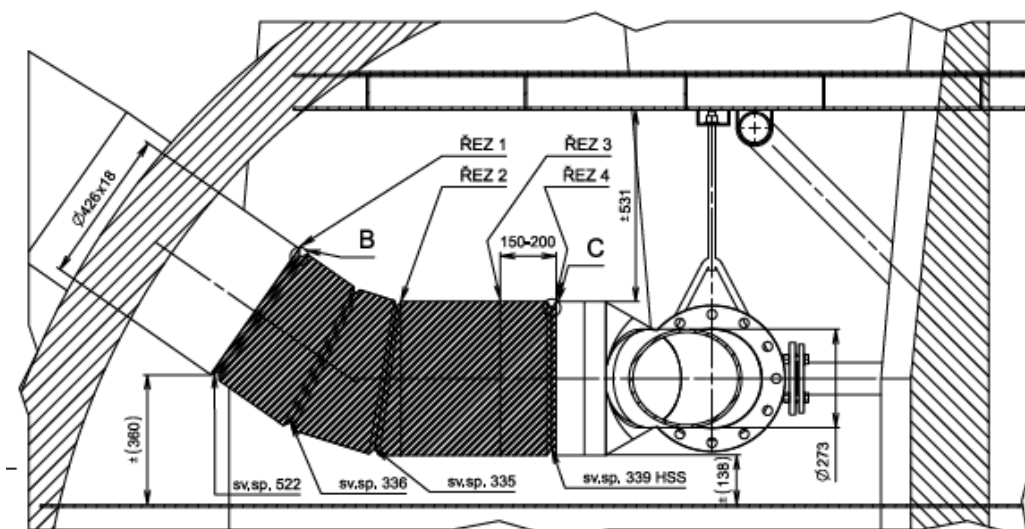
Obr. 1: Schéma rozvodu napájecí vody PGV 440



Obr. 2: Pohled na konstrukci přírubového spoje NV PGV 440



Obr. 3: Výcvik svářečů a pohled na svařovaný nový přírubový mezikus



Obr. 4: Schéma výměny části rozvodu NV PG 1000



Obr. 5: Navařování návaru a provedení svarového spoje automatem



Obr. 6: Navařování návaru a provedení svarového spoje automatem

Literatura

- [1] ŠKODA JS a.s.: *Atestační prgram svařovacích drátů pro rekonstrukci rozvodu napájecí vody PG typu VVER 440 na JE Dukovany*. Zpráva, Ae 18895/Dok., ŠKODA JS a.s.
- [2] ŠKODA JS a.s.: *Úvodní poznámky k použití procesu STT Lincoln Electric pro opravné svařování TNR VVER*. Zpráva, Ae 11410/Dok, ŠKODA JS a.s.
- [3] ŠKODA JS a.s.: *Opravné svařování v jaderné energetice*. Zpráva, Ae 9291/Dok, ŠKODA JS a.s.
- [4] ŠKODA JS a.s.: *Procesy svařování v jaderné energetice*. Zpráva, Ae 17316/Dok, ŠKODA JS a.s.
- [5] ŠKODA JS a.s.: *Opravné svařování v ŠJS 2008-2018*. Zpráva, Ae 17317/Dok, ŠKODA JS a.s.
- [6] Ghosh, P. K. (2017): *Pulse Current Gas Metal Arc Welding*. Springer Singapore, Singapore. ISBN 978-981-10-3556-2
- [7] Weman, K., Lindén, G. (2006): *MIG welding guide*. Woodhead Publishing, Cambridge (England). ISBN 978-1-85573-947-5

HODNOCENÍ PŘEDPÍNACÍCH KABELŮ VYJMUTÝCH Z KONTEJNMENTU ETE

EVALUATION OF PRESTRESSED CABLES REMOVED FROM NPP TEMELIN CONTAINMENT

Dana Tonarová, Petr Brabec, Zdeněk Fencel, Miroslav Krpec a Antonín Šik

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

V rámci sledování stavu kontejnmentu elektrárny Temelín (ETE) probíhá vyjmutí vybraných kabelů a kontrola jejich stavu po dlouhodobém provozu. Předpínací kabely jsou podrobeny zevrubné kontrole a koncová část kabelů s montážní očnicí je odebrána k zátěžové stendové zkoušce. Laboratorní hodnocení drátů se sestává z detailní vizuální prohlídky zaměřené na mechanické a korozní poškození drátů, stanovení mechanických vlastností, které jsou doplněné metalografickým a fraktografickým hodnocením.

Abstract

In order to monitor the condition of the NPP Temelin containment, the selected cables are removed and checked after long-term operation. The prestressing cables are thoroughly inspected and the end part of the cables with mounting thimble is taken for a stress test. Laboratory evaluation of cables consists of detailed visual inspection, evaluation of mechanical and corrosion damage of cables, determination of their mechanical properties, metallographic and fractographic evaluation.

Úvod

Kontejnment ETE slouží jako hermetická ochranná obálka jaderného reaktoru, která chrání reaktor před vnějšími vlivy (klimatické, seismické, terorismus atd.) a zároveň slouží jako poslední bariéra proti úniku radioaktivních látek do okolí. Kontejnment je tvořen předpjatou železobetonovou konstrukcí. Předepnutí je realizováno systémem volných předpínacích kabelů, které jsou vedeny kabelovými kanály. Válcová část kontejnmentu je předepnuta 96 kabely a část kopule 36 kabely. Předpínací kabely jsou vyrobeny z vysokouhlíkové ušlechtilé oceli s nízkou relaxací o průměru drátu 5 mm, viz tab. 1. Původní typ předpínacích kabelů z roku 1993 obsahoval 450 drátů, nové kabely obsahují 478 drátů při zachování stejného materiálu a průměru drátu. Kabely válcové části jsou kotveny na horní hraně válce v opěrném věnci, dále jsou vedeny ve tvaru šroubovice ke spodnímu okraji válce, kde jsou ohnuty a vrací se zpět ke kotvě na horním okraji válce. [1]

Tab. 1: Parametry drátů předpínacích kabelů [2]

Ocelový drát s nízkou relaxací čsl. výroby vyráběný podle podnikové normy PN 22-285-88		
Jmenovitý průměr D	5,0	mm
Normová pevnost v tahu R_{pn}	1800,0	MPa
Mez kluzu $R_p 0,2$	1620,0	MPa
Výpočtová pevnost v tahu R_{pd}	1440,0	MPa
Modul pružnosti E_p	200000,0	MPa
Nejnižší tažnost	4,0	%
Relaxace při teplotě do 20 °C	2,5	%
při teplotě do 40 °C	4,5	%
při teplotě do 60 °C	8,0	%

Pro posouzení a zdokumentování stavu jsou předpínací kabely vyjímány z konstrukce kontejnmentu. Výsledkem kontrol je posouzení změn parametrů vyjmutého kabelu z hlediska spolehlivosti předpínacích kabelů, které zůstávají v kontejnmentu [3].

Vyjímání předpínacích kabelů z konstrukce

Vyjmutí kabelů z kanálků kontejnmentu ETE a jejich výměna za nové svazky se provádí podle technologického postupu M54MS5BE002 [4]. Při vyjímání kabelů z konstrukce se na místě vizuálně kontroluje stav očnice, stav dostupných drátů (výskyt koroze a mechanického poškození) a stav konzervační vazelíny. Po vyjmutí výrobní očnice (obr. 1) se kontroluje stav drátů v místě ohybu na očnici. Předpínací kabely se vytahují z kabelového kanálku tak, aby nedocházelo k otírání vazelíny a křížení drátů. Po vytažení kabelů se provádí vizuální kontrola kabelového kanálku, poté je kabel převezen do haly předpínací základny ETE pro kontrolu celého kabelu.



Obr. 1: Celkový pohled po vyjmutí výrobní očnice [5]

Vizuální kontrola celého kabelu z provozu

Vizuální kontrola je zaměřena na celou délku předpínacího kabelu, tj. přibližně 100 metrů. Na jednom konci je smyčka bez výrobní očnice, na druhém konci je montážní očnice pro kontrolu ponechána. Vizuální kontrola je zaměřena na typ a rozsah přítomných vad. Dle příslušného předpisu 01.SA.18 [3] se při vizuální prohlídce kabelu provádí fotodokumentace v ekvivalentních vzdálenostech cca 1 metr.

Na základě hodnocení VT kontroly na rovných referenčních úsecích kabelu lze konstatovat, že v průběhu kontrol nebylo zaznamenáno žádné provozní (v podobě deformace či přetržení drátů) ani korozní poškození drátů. V oblasti vyjmuté výrobní očnice se obvykle vyskytují přetržené dráty v řádu jednotek kusů. Lom drátu provozního původu byl vždy lokalizován v blízkosti vrcholu ohybu na očnici. Na přetržených i lomem neporušených drátech bylo dokumentováno lokální napadení koroze, doprovázené přítomností vrstvy korozních produktů černé barvy. Korozní napadení drátu se vyskytuje v místech degradace vazelíny. Po vizuální kontrole jsou pro další laboratorní zkoušky odebrány dráty z referenčních úseků a z oblastí s výskytem vad.

Stendová zatěžová zkouška

Odebrán je 15metrový úsek kabelu s montážní očnicí. Na tomto konci kabelu se provádí zatěžovací stendová zkouška, která simuluje přetížení kabelu včetně LOCA nehody. Na konci zatěžovacího testu jsou kabely zatíženy na hodnotu, která simuluje zvýšení síly v předpínacích kabelech při maximální projektové havárii. Po dokončení zátěžového testu jsou ze zkoušeného úseku odebrány segmenty pro následné laboratorní hodnocení stavu drátů dle řídicího předpisu PP 2302.359 [6].

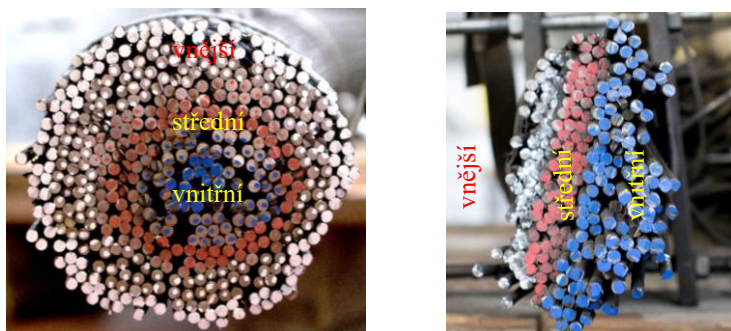
Vizuální kontrola kabelu po stendové zkoušce

Úlohou vizuální kontroly kabelu je ověření stavu jednotlivých drátů, na jejímž základě je proveden odběr referenčních a poškozených vzorků z různých vrstev kabelového svazku.

Rovná část

Z vnější, střední a vnitřní vrstvy kabelového svazku se vyberou vzorky referenčních drátů bez poškození, viz obr. 2a. Po označení vrstev drátů se svazek drátů z rovné části rozvolní a sleduje se pokrytí drátů konzervační vazelinou.

Na hodnocených drátech z rovné části kabelu byl vždy konstatován bezvadný stav. Dráty byly potaženy tenkou vrstvou vazelíny bez známek degradace. Očištění pomocí organického rozpouštědla neodhalilo korozní napadení ani mechanické poškození v podobě otlaků apod.



Obr. 2: Celkový pohled na rovný úsek rozčleněný na 3 vrstvy/zóny drátů v profilu [7]

Část s montážní očnicí

Vizuální kontrola je provedena po vyjmutí montážní očnice a následném očištění pomocí organického rozpouštědla. Dráty jsou na řezu postupně označovány barevným nátěrem stejně jako u rovného úseku (obr. 2b). Z každé vrstvy jsou pro laboratorní zkoušky vybrány 3 referenční dráty. U každého drátu je posuzováno, zda je prohnutý „ideálně“ elipticky nebo jsou v ohybu přítomné markantní asymetrické prvky či koroze. Důležitým sledovaným znakem mechanického poškození je přítomnost otlaků. Všechny prasklé dráty, vybrané vzorky s korozním napadením a mechanickými otlaky jsou předány k podrobnému laboratornímu hodnocení.

Obecně se na vnějším povrchu kabelových smyček vyskytuje dostatečné množství vazelíny a dráty nenesou známky korozního napadení či mechanického poškození. V oblasti vnitřní vrstvy byly nalezeny prasklé dráty (obr. 3), byl zde zaznamenán úbytek vazelíny a na povrchu drátů byly patrné skvrny korozních produktů. Vinutí kabelu vykazovalo přítomnost lokální asymetrie v podobě vybočení a zprohýbání drátů, což bylo místy doprovázeno viditelným křížením. Vyšší počet křížících se drátů korespondoval s přítomností otlaků, ve kterých pak mohou působením vnějších sil (provozních, zatěžování na standu) vznikat lomy.



Obr. 3: Pohled na vnitřní část smyčky kabelů – úbytek konzervační vazelíny, korozní napadení a viditelné lomy drátů [7]

Laboratorní hodnocení stavu kabelu

Cílem laboratorního hodnocení je ověřit vlastnosti drátu použitého na výrobu kabelu po provozní expozici v prostředí ochranné obálky kontejnmentu a dále pak po dodatečných stendových zatěžovacích zkouškách. Laboratorní hodnocení se sestává z hodnocení mechanického a korozního poškození, stanovení mechanických vlastností, metalografického a fraktografického hodnocení. V následujících kapitolách budou shrnuty výsledky z celkového hodnocení v letech 2011-2019.

Stanovení mechanických vlastností

Předepsané testy dle předpisu 01.SA.18 [3] zahrnují statickou zkoušku tvrdosti, statickou zkoušku tahem za pokojové teploty a zkoušku střídavým ohybem.

Z výsledků měření je patrné, že u předpínacích kabelů dochází během zatěžování ve stendu vlivem opakovaných zatěžovacích cyklů ke zpevnění materiálu jednotlivých drátů. O tom svědčí zvýšená tvrdost materiálu a snížená tažnost, jak v rovných referenčních oblastech, tak i z konce kabelu. Mez pevnosti R_m byla u testovaných drátů ve všech případech dostačující a u všech drátů přesahovala svými výsledky normované hodnoty. V oblasti konce kabelu po stendové zkoušce se vyskytovaly dráty, u kterých byla naměřena mez kluzu $R_{p0,2}$ menší než pro nové dráty.

Metalografické a fraktografické hodnocení vybraných drátů

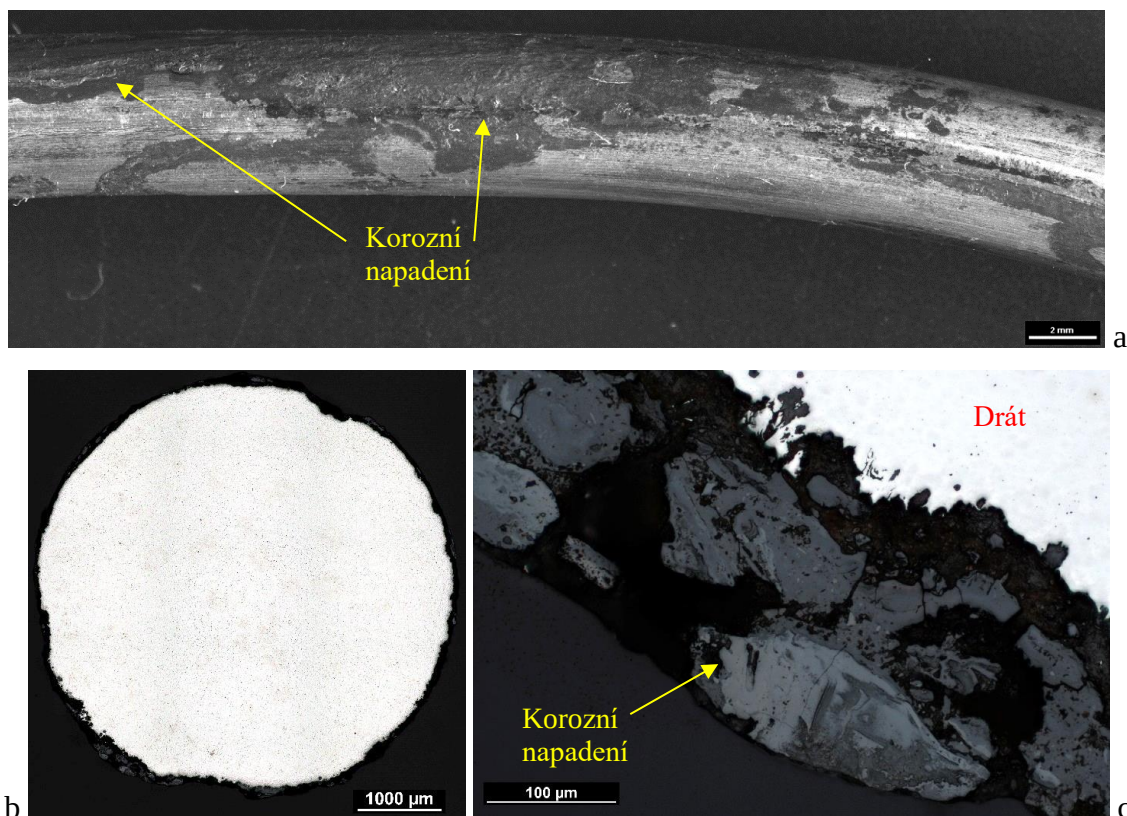
Na základě vizuální kontroly jsou k detailnímu laboratornímu hodnocení odebrány vzorky z kontrolních úseků rovné části, ohybu kabelu a konce kabelu bez očnice, příp. další dle výskytu korozního či mechanického poškození. Dále jsou k podrobnému hodnocení odebrány všechny dráty, u kterých došlo k přetržení. Soubor laboratorních vzorků je doplněn vybranými vzorky s výraznými otlaky a hloubkovým korozním napadením.

Kontrola povrchu všech odebraných vzorků drátů a ověření jejich **rozměrové přesnosti** byla prováděna pomocí stereomikroskopu. Skutečný průměr drátu je kontrolován podle ČSN 42 6403 [8].

Hodnocení mikrostruktury je prováděno na leptaných metalografických výbrusech příčného a podélného řezu drátu. **Mikročistota** materiálu je kontrolována na neleptaných výbrusech podélného řezu drátu podle ČSN ISO 4967 [9].

Metalografickým hodnocením bylo zjištěno, že základní materiál má jemnou perlitickou strukturu se silnou deformací ve směru tažení drátu (vláknitá struktura), která je typická pro daný typ materiálu. Mezi vzorky ze všech odebraných kabelů nebyl zaznamenán žádný rozdíl v mikrostrukturní charakteristice. Ve struktuře byly ve všech hodnocených drátech pozorovány vměstky dvojího typu: protažené sulfidické vměstky (typ A) a globulární až ostrohranné oxidy (typ D).

Korozní a mechanické poškození bylo hodnoceno mikroskopicky v metalografickém řezu se zaměřením na přítomnost povrchových trhlin a jejich hloubku, hloubku rýh, korozního napadení a případnou přítomnost dalších typů vad (otlaky apod.). Mikroskopické hodnocení korozního napadení bylo provedeno postupy podle ČSN 03 8137 [10]. Dráty vykazovaly nerovnoměrné korozní poškození do hloubky, které nepřevyšovalo hodnotu 0,5 mm (obr. 4). Nebyly zaznamenány plošné korozní úbytky oslabující průřez drátu o více než 1 mm². Dle ČSN 03 8137 [10] se na povrchu drátů vyskytovala koroze podpovrchová, důlková a koroze po vrstvách. Po stendové zkoušce nebyly nalezeny žádné nápadné odchylky v přítomnosti výrobních a montážních vad ani korozní poškození oproti kontrolním úsekům z celého kabelu.



Obr. 4: Koroze drátů: a) koroze na povrchu drátu [7], bc) koroze v řezu drátu [11]

Fraktografickému hodnocení jsou podrobeny vybrané lomy drátů odebraných při vizuální kontrole a dále lomy drátů po mechanických testech. Přetržené dráty se vyskytovaly převážně ve vnitřní vrstvě kabelové smyčky. Lomy, které vznikly při provozu byly pokryté korozní vrstvou. Lomy ze stendové zatěžovací zkoušky byly na povrchu lesklé a čisté bez výskytu koroze. Lomové plochy drátů, u kterých došlo během zatěžovací zkoušky k přetržení, vykazovaly téměř jednotné porušení. Na plochách se vyskytovalo v převážné většině smykové porušení (lomové plochy byly orientovány pod úhlem 45°) charakterizované důlkovou morfologií. U všech přetržených drátů se v lomové ploše vyskytovalo většinou tvárné porušení tzv. dřevitý lom charakteristický řádkovitou texturou, fazety křehkého transkrystalického porušení, které jsou charakteristické pro víceosé tahové napětí a sekundární trhliny. Iniciační místa byla lokalizována v oblastech otlaků, tzn. v místech ve kterých docházelo k maximální kumulaci napětí při stendových zkouškách.



Obr. 5: Lom drátů po stendové zkoušce: a) lom s otlakem, stereomikroskop, b) lomová plocha, SEM [11]

Závěr

Na základě hodnocení vyjmutých předpínacích kabelů z kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín je patrné, že hlavní příčinou praskání drátů je vznik otlaků, způsobených montážním křížením drátů na očnici.

K praskání drátů dochází především ve vnitřních vrstvách kabelového svazku v blízkosti povrchu očnice, kde mají dráty menší rádius ohybu. Vyhodnocení prasklých drátů prokázalo, že ke všem lomům došlo v místě, kde byl drát otačen, tzn. jeho profil nebyl kruhový. Deformací spojenou se změnou průřezu drátu dochází ke vzniku tenké vysoce křehké povrchové vrstvy, kde se iniciují trhliny, které následně způsobí lom celého drátu.

V ÚJV Řež, a. s. byl navržen nový způsob zavádění kabelů tak, aby nedocházelo ke křížení jednotlivých drátů, a tím následně k lomu. Při použití nového zavaděče si dráty zachovají své mechanické vlastnosti a nedochází k mechanickému poškození povrchu. Nové opatření zamezující křížení drátů je zpracováno v pracovním postupu M54MS5BE001 [12].

Po provedení podrobného vyhodnocení zkoušek lze konstatovat, že předpínací kabely splňují předpoklad pro provoz do konce provozní životnosti (35 let) daný rozsahem realizovaných zkoušek.

Literatura

- [1] Státní úřad pro jadernou bezpečnost (2017): *NÁRODNÍ ZPRÁVA ČESKÉ REPUBLIKY pro účely pro účely Topical Peer-Review „Řízené stárnutí“ dle Směrnice o jaderné bezpečnosti 2014/87/EURATOM*. SÚJB/IB/24698/2017, Praha.
- [2] Šik, A. a kol. (2017): *Zkoušky předpínacích kabelů ochranné obálky ETE*. Zpráva, DITI 2310/168, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [3] ČEZ, a. s. (2014): *Instrukce technické kontroly č. 01.SA.18: Kontroly a zkoušky na vyjmutém kabelu ochranné obálky*. ČEZ, a. s.
- [4] M54MS5BE002: *Výměna předpínacího kabelu ochranných obálek HVBI a 2 JE Temelín*.
- [5] Brabec, P. a kol. (2014): *Závěrečná zpráva z kontrol a zkoušek vyjmutého kabelu 1.18K, 1.10K mimo odebraný konec*. Zpráva, DITI 2302/247, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [6] (2019): *Hodnocení koncového segmentu kabelu ochranné obálky HVB ETE po stendové zkoušce*. Pracovní postup, PP 2302 359, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [7] Brabec, P. a kol. (2017): *Hodnocení vyjmutých segmentů kabelů z HVB po stendových zátěžových zkouškách – kabely 1.10K, 1.18K*. Zpráva, DITI 2302/468, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [8] ÚNMZ (1967): *Norma ČSN 42 6403: Tažené ocelové dráty kruhového průřezu. Základní rozměrová norma*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [9] ČNI (2003): *Norma ČSN ISO 4967: Ocel – Stanovení obsahu nekovových vměstků – Mikrografická metoda využívající normovanou zobrazení*. Český normalizační institut, Praha.
- [10] ČNI (1989): *Norma ČSN 03 8137: Ochrana proti korozi. Kovy, slitiny a kovové povlaky. Metalografické vyhodnocování korozního napadení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [11] Fencel, Z. a kol. (2019): *Hodnocení vyjmutých segmentů kabelů z HVB po stendových zátěžových zkouškách – kabely 2.13K, 2.19K*. Zpráva, DITI 2302/621, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [12] M54MS5BE001: *Předpínací kabely ochranných obálek HVBI a 2 ETE (Kompletace předpínacího kabelu)*.

PROGRAM ŘÍZENÍ STÁRNUTÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORŮ VVER PRO ZAJIŠTĚNÍ LTO +30

AGING MANAGEMENT PROGRAM OF VVER RPV INTERNALS FOR LTO +30

Miroslav Žamboch, Petr Vlček a Ondřej Plíhal

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Vnitřní části reaktoru (VČR) nejsou komponentou tlakového rozhraní, ale plní důležité bezpečnostní funkce: zabezpečení konfigurace aktivní zóny, zabezpečení funkce řídicího systému reaktoru, zabezpečení proudění média v reaktoru, a dále neutronové a gama stínění materiálů tlakové nádoby reaktoru (TNR). VČR jsou vystaveny celé řadě stresorů: vysoká radiace, vysoká teplota / teplotní změny, tlak, neutronové záření, vibrace, prostředí primárního okruhu způsobujících degradaci materiálů. V souvislosti s přechodem na LTO a současnými zvyšování bezpečnostní požadavků vznikl požadavek komplexně řídit stárnutí VČR – v rámci programu řízení stárnutí. Pro reaktory VVER 440 / 1000 provozované v ČR byl implementován komplexní program řízení stárnutí VČR.

Abstract

Reactor internals are not part of the primary circuit pressure boundary but fulfil following safety important functions: support of the core, support of the control rod assemblies, medium flow control, shielding of the reactor pressure vessel. The internals are influenced by several stressors: high gamma and neutron irradiation, high operational temperature, changes of temperature, vibration, primary water environment, pressure. The simultaneous influence of stressors can cause degradation of the internal materials. To ensure functions of the internals during LTO and to fulfil continually increasing safety requirements the complex Aging management program of RPV internals was implemented for VVER 440 / 1000 reactors in Czech Republic.

Úvod

Jediným provozovatelem jaderných elektráren v ČR je společnost ČEZ, a. s. ČEZ, a. s. konkrétně útvar Příprava dlouhodobého provozu jaderných elektráren (PDP JE) je garantem odpovědným za řízení stárnutí VČR a pro tyto účely využívá externího dodavatele ÚJV Řež, a. s.

Program řízeného stárnutí (PŘS) je implementován dle požadavků ČEZ, dle požadavků dobré světové praxe (IAEA) s využitím know-how externího dodavatele. Vzhledem k rozsáhlosti problematiky spojené s řízením stárnutí VČR ÚJV Řež do PŘS VČR zapojuje další organizace v ČR jako subdodavatelé specifických činností / analýz. Jedná se zejména o: Centrum výzkumu Řež, Západočeskou univerzitu, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, Ústav přístrojové techniky AV Brno. Stav VČR a stav řízení stárnutí VČR jsou pro všechny bloky hodnoceny periodicky 1x ročně. Vzhledem k různé rychlosti rozvoje jednotlivých DM, vzhledem ke komplexnosti a náročnosti prováděných analýz je četnost jednotlivých hodnocení prováděna s frekvencí 1x 1-5 let. Hodnocení VČR je založeno na přístupu NTD A.S.I., Sekce IV, vydání 2019. Na základě hodnocení jsou v případě potřeby dodavatelem PŘS navrhována nápravná opatření, která jsou pro projednání a schválení realizována provozovatelem.

Rozsah programu (Komponenty a degradační mechanismy (DM))

VČR jsou umístěny v tlakové nádobě reaktoru. Skládají se z následujících hlavních komponent.

VVER 440:

- šachta, dno šachty,
- koš aktivní zóny KAZ (plášť, hraněné plechy a hraněné pásy, šrouby spojující hraněné plechy a hraněné pásy),
- Blok ochranných trub BOT.

VVER 1000:

- šachta,
- plášť aktivní zóny (PAZ),
- blok ochranných trub.

Hlavním konstrukčním materiálem (VVER 440, VVER 1000) je Ti stabilizovaná ocel 08CH18N10T.

Vzhledem k provozním podmínkám VČR – vysoká úroveň gama a neutronového záření, vysoká teplota (provozní teplota plus gama ohřev), prostředí primárního okruhu, vibrace působené pulsací média buzenými hlavními cirkulačními čerpadly dochází k rozvoji následujících degradačních mechanismů:

- vysoko cyklová únava,
- nízkocyklová únava,
- otěr,
- mechanické poškození (při manipulaci i provozu),
- radiační a tepelné stárnutí (zpevnění / křehnutí),
- radiační creep a radiační bobtnání,
- IASCC.

Dále jsou uvažovány zobecněné DM technické stárnutí a koncepční stárnutí na základě informací ze světa ve smyslu vývoje poznání v oblasti řízení stárnutí (poznatky o materiálech, degradacích, nových NDT metodách) a změny v oblastech technické legislativy.

V rozsahu PŘS jsou všechny komponenty VČR a všechny identifikované DM. Komponenty byly rozčleněny vzhledem k citlivosti k jednotlivým DM, kde to bylo vhodné, byla identifikována kritická místa z hlediska rozvoje DM. Komponenty (případně subkomponenty) identifikovány jako citlivé, jsou v rámci programu pravidelně hodnoceny vzhledem k určeným DM, nápravná opatření pro komponenty s vyšší mírou tolerance vůči jednotlivým DM závisejí na výsledcích hodnocení citlivých komponent.

Preventivní činnosti pro minimalizaci dopadů stárnutí

Minimalizace dopadů stárnutí je nedílnou součástí procesu řízení stárnutí. Je jí dosaženo pravidelným prováděním předepsané údržby s dodržováním pracovních postupů (správné umístění VČR a komponent VČR v reaktoru – zabránění mechanickému poškození, minimalizace vibrací), kulturou provozování (dodržováním provozních předpisů a následnou minimalizací pracovních cyklů – nižší čerpání únavového poškození), dodržování chemických režimů primárního okruhu (zajištění odolnosti vůči IASCC, SCC), low leakage konfigurace aktivní zóny (snižuje radiační zátěž na některé komponenty VČR).

Detekce dopadů stárnutí

Pro hodnocení životnosti VČR je závazná metodika obsažená v NTD A.S.I., Sekce IV, 2019. Rozvoj jednotlivých DM je hodnocen výpočetně na základě analýzy rozvoje takzvaných kritických událostí, přičemž z hlediska funkčnosti a životnosti komponenty jsou kritické poslední tři:

- vznik únavové trhliny,
- vznik IASCC trhliny,
- vznik omezené zkřehlé oblasti LEA,
- nestabilní šíření trhliny,
- ztráta únosnosti,
- nepřípustná změna geometrie VČR.

Další dopady stárnutí vyplývající z opotřebení provozem jsou detekovány na základě vibrační diagnostiky prováděné pro VVER 440 provozním diagnostickým měřením SPD (snímače absolutního posuvu) a pro VVER 1000 na základě trendových odchylek akcelerometrů na víku reaktoru z celé kampaně z instalovaného diagnostického systému RVMS přímo na elektrárně. Jedná se o kvalitativní posouzení vibračního chování VČR vzhledem k vibrační masce stanovené dodavatelem, nebo standardní provozní kampani. Výstupy z vibrační diagnostiky slouží k ověřování platnosti předpokladů provedených hodnocení odolnosti vůči vysokocyklové únavě.

Opotřebení provozem a případné mechanické poškození je detekováno na základě hodnocení nálezů z Programu provozních kontrol. Pro inspekce jsou používáno vizuální zkoušení zejména s použitím televizního řetězce.

Pro VVER 1000 je vyvíjeno zařízení pro měření geometrie PAZ, u kterého dochází k deformaci následkem rozvoje radiačního creepu a bobtnání.

Monitorované a kontrolované parametry a jejich trendování

Monitorované a kontrolované parametry poskytují informace pro hodnocení, nebo jsou výstupem z vlastního prováděného hodnocení.

Monitorované parametry jsou:

- provozní historie,
- distribuce neutronových fluencí,
- nestabilní šíření trhliny,
- ztráta únosnosti komponenty,
- nepřípustná změna geometrie rozvojem radiačního creepu a swellingu (připravováno).

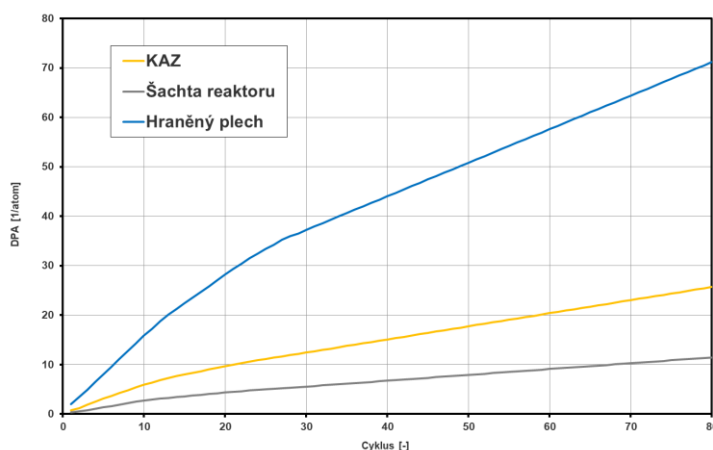
Provozní historie

V průvodní technické dokumentaci je stanoven maximální počet povolených změn provozních režimů. Provozní historie je pravidelně (1x za kampaň) zaznamenávána do databázové aplikace LTOs a je vyhodnocován počet jednotlivých provozních režimů vůči predikci a limitním počtům v technických podmínkách.

Pro stanovení neutronových fluencí jsou v rámci provozní historie sledovány a zaznamenávány informace a po proutkové tepelné výkony pro všechny palivové proutky a pro všechny časové úseky daného palivového cyklu, denní výkony, kalendářní a efektivní dny, vyhoření celé AZ daného bloku na začátku a konci palivového cyklu, schéma palivové překládky daného palivového cyklu.

Distribuce neutronových fluencí

Výpočetní stanovení fluencí obdržených materiálem VČR je prováděno periodicky jednou ročně, následně je prováděno integrální vyhodnocení obdržené fluence za proběhlý provoz a predikce obdržené fluence až na 80 kampaní provozu.



Obr. 7: Predikce fluence neutronů pro KAZ, hraněný plech, hraněný pás, E:1MeV [2]

Nestabilní šíření trhliny

K iniciaci / nestabilnímu šíření trhliny může dojít na základě iniciace únavové trhliny, IASCC trhliny, nebo rozvoje lokální zkřehlé oblasti LEA. Iniciace a případný nestabilní růst trhliny je monitorován (a případně trendován) v rámci PPK reaktoru vizuálním zkoušením dle příslušných schválených metodických postupů. Nestabilní růst trhliny se hodnotí ve shodě s NTD A.S.I., Sekce IV, 2019 vzhledem k iniciaci a následnému šíření výše uvedenými degra-dačními mechanismy.

Ztráta únosnosti komponenty

Ztráta únosnosti komponenty se hodnotí vzhledem k nestabilnímu růst trhliny ve shodě s NTD A.S.I., Sekce IV, 2019 vzhledem k iniciaci a následnému šíření trhliny degra-dačními mechanismy uvedenými v podkapitole výše.

Nepřípustná změna geometrie rozvojem radiačního bobtnání a radiačního creepu

Nepřípustná změna geometrie komponenty (PAZ pro VVER 1000) je hodnocena na základě výpočetního hodnocení rozvoje radiačního creepu a bobtnání vzhledem k vybraným konstrukč-

ním uzlům. Výpočetní hodnocení je trendováno až na 80 kampaní provozu. Je připravováno měření změny geometrie (PAZ) přímo na díle k tomu účelu vyvinutým inspekčním zařízením.



Obr. 8: Vybrané konstrukční uzly PAZ pro hodnocení deformačního creepu a bobtnání projevujících se makroskopickou deformací PAZ [3]

Kritéria přijatelnost

Splnění kritérií přijatelnosti prokáže provozuschopnost VČR, predikce splnění kritérií přijatelnosti po dobu plánovaného provozu predikuje zajištění plánované životnosti vnitřních částí. Jiným slovy: Stav VČR je vyhovující / má zajištěnou zbytkovou životnost, pokud jsou splněna kritéria přijatelnosti do okamžiku dalšího vyhodnocení / do konce předpokládané doby provozu.

Stav VČR je ve shodě s NTD A.S.I. hodnocen vzhledem ke kritickým událostem:

- nestabilní šíření trhliny,
- ztráta únosnosti komponenty,
- nepřipustné změně geometrie (vlivem radiačního creepu a bobtnání).

Poznámka: Dle metodiky hodnocení [1] může ke vzniku únavové, případně IASCC trhliny nebo lokální zkřehlé oblasti dojít a bezpečnost i funkce VČR bude zachována, pokud budou splněna kritéria pro nestabilní růst trhliny a ztrátu únosnosti komponenty.

K nestabilnímu šíření trhliny nedojde, pokud je splněna následující podmínka [1]:

$$n_J \cdot J^e < J_c, \quad (1)$$

kde J^e je elastická část J-integrálu závisající na rozměrech trhliny, jakož i na primárních zatíženích a sekundárních zatíženích, n_J je bezpečnostní koeficient, který se vezme rovným: $n_J=1,2$ a J_c je kritická hodnota J-integrálu závisající na dávce poškození neutronovým zářením, teplotě ozáření a aktuální provozní teplotě T .

Ke ztrátě únosnosti nedojde, pokud je splněna následující podmínka [1]:

$$\sigma_{\text{ref}} < \sigma_Y^0, \quad (2)$$

kde σ_{ref} je referenční napětí závislé na velikosti trhliny a zatížení, σ_Y^0 je mez kluzu materiálu v neozářeném stavu na provozní teplotě.

K nepřipustné změně geometrie vlivem radiačního creepu a radiačního bobtnání (VVER 1000 – PAZ) nedojde, bude-li splněna následující podmínka:

$$s < 2,5, \quad (3)$$

kde s je posuv vybraného konstrukčního uzlu PAZ v mm směrem od osy reaktoru.

Poznámka: Pro EDU se nepřipustná změna geometrie následkem rozvoje creepu a radiačního bobtnání vzhledem k současným výsledkům výpočetního hodnocení nepředpokládá.

Nápravná opatření

Součástí PŘS je formulace nápravných opatření v závislosti na výsledcích hodnocení a predikované zbytkové životnosti vnitřních částí. Ta mohou být směřována do provozu – např. zlepšení kvality dat a následně zpřesnění hodnocení, technická opatření pro zvýšení teplota v havarijních nádržích, implementace kvalifikovaných NDT kontrol umožňujících postulování menších výpočetních defektů, případně do vlastní metodiky hodnocení – odstranění nadměrných konzervatismů.

Zpětná vazba z provozních zkušeností a vědy a výzkum

Zpětná vazba poskytující informaci o účinnosti nápravných opatření a vlastním procesu řízení stárnutí je dána zejména periodicitou prováděných hodnocení a predikcí, informacemi z činností realizovaných přímo na JE (PPK, hodnocení stavu technologických systémů, poruchové komise a další).

Závěr

Na jaderných elektrárnách v České republice byl implementován PŘS VČR, který ve shodě s požadavky dobré světové praxe, ve shodě s požadavky české technické legislativy – s využitím metodických postupů NTD A.S.I. monitoruje, predikuje a zmírňuje identifikované DM vnitřních částí. Zajišťuje tak bezpečný dlouhodobý provoz vnitřních částí. Program je v souladu s měnícím se stavem poznání (Technické a Koncepční stárnutí) kontinuálně aktualizován. Vzhledem k náročnosti programu je nutná kooperace mnoha subjektů české vědecké a technické sféry.

Literatura

- [1] NTD A.S.I. (2019): *Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů, Sekce IV, NTD A.S.I., Praha, No. 19.
- [2] Montero, P. C. (březen 2019): Výpočet fluencí neutronů a gama ohřevů ve VČR 2. bloku EDU pro 31. kampaň. Technická zpráva, 18698, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Řež.
- [3] Pištora, V., Lauerová, D., Anděl, J. (2014): *Hodnocení VČR ETE (plášť aktivní zóny) s uvažováním creepu a swellingu*. Technická zpráva, DITI 2301/332 rev. 2, ÚJV Řež, a. s., Řež

PASIVACE PRIMÁRNÍHO OKRUHU 3. BLOKU JE MOCHOVCE V PRŮBĚHU HORKÝCH HYDROZKOUŠEK

PASSIVATION OF INTERNAL SURFACE OF REACTOR COOLANT SYSTEM OF NPP MOCHOVCE UNIT 3 AT HOT FUNCTIONAL TESTS

Martin Krondřák ^{a)}, Pavel Kůs ^{b)}, Martin Skala ^{b)}, Alena Kobzová ^{a)}, Petr Brabec ^{a)},
Patricie Halodová ^{b)}, Zbyněk Veselka ^{a)}, Janka Mihóková ^{c)} a Štefan Tkáč ^{c)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} Centrum výzkumu Řež, s. r. o.

^{c)} Slovenské elektrárne, a. s.

Abstrakt

Účelem pasivace povrchů zařízení I.O je vytvoření oxidické korozní vrstvy ochranného charakteru, která má za následek snížení rychlosti koroze konstrukčních materiálů I.O a snížení rychlosti a množství korozních produktů uvolňovaných do chladiva, což ve svém důsledku vede ke snížení množství materiálu aktivujícího se v aktivní zóně reaktoru a podílejícího se na formování radiačních polí v okolí zařízení I.O.

Příspěvek stručně popisuje provedení pasivace vnitřních povrchů I.O. v průběhu horkých hydrozkoušek 3. bloku JE Mochovce a hodnocení vzniklé vrstvy.

Abstract

The goal of a passivation of internal surface of reactor coolant system is to create an oxidic corrosion layer. The layer protects the surface and decreases construction materials corrosion rate and thus decreases release of corrosion products into reactor coolant. As a consequence, an amount of activated corrosion products in the reactor core is lower as well as radiation fields around reactor coolant system components.

The proceeding briefly describes hot functional tests performance of reactor coolant system inner surface of NPP Mochovce Unit 3 together with an evaluation of final layer.

Úvod

Za první kontakt konstrukčního materiálu primárního okruhu nové jaderné elektrárny s vodním prostředím, jenž má vliv na tvorbu pasivační vrstvy a následně na korozní chování daných materiálů, lze považovat horké zkoušky (HZ) systému I.O., kdy dochází k ohřevu chladiva a zvýšení jeho teploty až na teplotu blízkou provozní.

Způsob provedení HZ, zejména aplikovaný chemický režim, udržování a stabilita technologických parametrů a samotné jejich trvání, má pak vliv na kvalitu vznikající pasivační vrstvy a následné korozní chování materiálů, tj. na procesy uvolňování korozních produktů do chladiva, jejich aktivaci a vznik radionuklidů. Toto vše pak v komplexu ovlivňuje budoucí intenzitu tvorby radiačních polí a radiační situaci v okolí komponent a zařízení I.O.

Vznik stabilní pasivační vrstvy na povrchu zařízení I.O. si vyžaduje, aby prostředí, ve kterém daná vrstva vzniká, bylo z chemického hlediska co možná nejbližší reálným provozním podmínkám, tj. alkalickému redukčnímu prostředí reaktorů VVER. Pouze tak je možné předejít situaci, kdy bude při přechodu k normálnímu provozu bloku docházet k nežádoucím transformacím pasivační vrstvy a možné ztrátě jejích pasivačních vlastností. Z tohoto hlediska je pak nutné vybírat i vhodný chemický režim.

Hydrotermální ochranná vrstva na povrchu materiálů je zpravidla tvořena dvěma podvrstvami, které se liší původem vzniku, chemickým a fázovým složením, morfologií a pasivačními vlastnostmi, a jsou označovány jako vnitřní a vnější oxidická vrstva.

Vnitřní oxidická vrstva vzniká v důsledku koroze základního materiálu. Její vznik je determinován rychlostí difúze iontů (Fe, Ni, Cr aj.) v krystalické struktuře materiálu. Vnitřní vrstva je kompaktní, soudržná, pseudomorfně srostlá s mřížkou kovu a elektricky nevodivá. Má ochranné pasivační vlastnosti, tj. její přítomnost na povrchu materiálu snižuje rychlost koroze a rychlost uvolňování KP do chladiva. Její složení závisí na příslušných hydrotermálních podmínkách, je však tvořena především z oxidů se spinelovou strukturou a ve vztahu k základnímu materiálu je obohacena o Cr. Poměr hlavních konstituentů Fe:Cr:Ni je povětšinou v rozmezí 5:5:1 až 10:10:1. Typickými složkami v podmínkách tlakovodních reaktorů jsou např. FeCr_2O_4 , Fe_2CrO_4 , FeCrNiO_4 apod.

Vnější oxidická vrstva vzniká rekrystalizací (přesrážením) z vodné fáze. Rychlost jejího vzniku je determinována rozpustností jejich složek v chladivu a intenzitou procesů přenosu hmoty. Vrstva je hrubě krystalická, méně přilnutá a soudržná. Vrstva je ve vztahu k základnímu materiálu obohacena zejména o Fe. Typickou vnější vrstvou v podmínkách tlakovodních reaktorů je magnetit Fe_3O_4 .

Průběh horkých zkoušek z pohledu chemického režimu

I. podetapa – Plnění I.O. – je zaměřená na zkoušky pohonů HRK a zkoušky těsnosti I.O. za studena při tlaku 0,5 MPa. Voda, která se používala pro naplnění havarijních nádrží, nádrže čistého kondenzátu (NČK) v nádržích 3KDD10,50BB001 splňovala veškeré předepsané parametry. Podetapa byla zahájena dne 5. 1. 2019. Dochází během ní k náhřevu reaktoru na 40-60 °C s kontinuální vodovýměnou a připojením obou větví čistící stanice ŠOV-1 a katexového filtru ŠOV-2 důležitých pro záchyt korozních produktů.

II. podetapa – Náhřev primárního okruhu – byla rozdělena do dvou částí, kvůli nápravě vyjevených netěsností. První část byla zahájena dne 5. 1. 2019 a druhá 8. 2. 2019.

III. podetapa – Dočišťování reaktoru – probíhala od 12. 2. do 21. 2. 2019. V podetapě byly zapojené filtry ŠOV-1 a ŠOV-2 (pouze katex) a kontinuálně se dávkoval hydrazín pro snížení koncentrace kyslíku v I.O., současně probíhalo termické odplynění. 16. 2. 2019 došlo k odpojení ŠOV-1 a ŠOV-2 a v provozu zůstal pouze směsný filtr 3KBF51BJ001. 17. 2. 2019 bylo zahájeno dávkování KOH do I.O.

IV. podetapa – Pasivace vnitřních povrchů začala 21. 2. 2019, kdy byl ustálen tlak na 12,6 MPa a teplota byla 260 °C. Hodnota vysokoteplotního pH byla udržována pomocí konstantního dávkování KOH do I.O. Řízení chemického režimu bylo realizováno připojováním směsného filtru 3KBF51BJ001 stanice ŠOV-1. Aby nedocházelo k odplynění vznikajícího vodíku na površích I.O., bylo omezeno odplynění chladiva. 6. 3. 2019 byla oficiálně ukončena pasivace vnitřních povrchů. Následovalo nasycení filtru 3KBF50BJ001 do draselné formy. Podetapa byla ukončena 7. 3. 2019.

V. podetapa – Dochlazení reaktoru – následovala od 7. 3. 2019 do 15. 3. 2019 a po celou dobu této podetapy byl udržovaný bezkyslíkový režim.

Monitorování chemického režimu

V rámci horkých zkoušek byly prováděny odběry vzorků. Vzorky pro chemickou analýzu byly odebírány za dochlazovačem 3KBF10BC002. Veškeré chemické analýzy byly prováděny chemickou službou EMO a byly měřeny následující chemicko-fyzikální parametry: vodivost, pH, propustnost, celkové železo, hydrazín, amoniak, kyslík, vodík, draslík, sodík, chloridy a TOC.

Jako hlavní korozní produkt bylo sledováno železo (ICP – MS) v I.O. Bylo sledováno ve třech formách – rozpuštěné, nerozpuštěné a celkové. Během IV. podetapy došlo k velmi nepatrnému navýšení Fe v I.O. Rozpuštěné železo se pohybovalo v rozmezí 0,1 – 17 µg/l. Celkové železo se pohybovalo v rozmezí 1–3 µg/l. Během zvyšování teploty ze 150 °C na cca 190 °C došlo k navýšení na max. 0,1 mg/l.

Monitorování vzniklé pasivační vrstvy

Hodnocení pomocí replik

Odběr replik povrchů přístupných částí primárního okruhu byl proveden pomocí silikonových otisků pro posouzení stavu povrchů po horké zkoušce bloku. Laboratorní hodnocení otisků bylo zaměřeno na analýzu extrahovaných částic z pasivovaných povrchů a celkovou charakteristiku replikovaného reliéfu.

Repliky byly v laboratoři podrobeny vizuální a mikroskopické kontrole. Povrchy vybraných vzorků byly dokumentovány stereomikroskopem a skenovacím elektronovým mikroskopem v režimu zpětně odražených elektronů a sekundárních elektronů. Částice zalité v replikách byly v SEM podrobeny analýze chemického složení pomocí energiově disperzního spektrometru.

Při vizuální kontrole vzorků byly pozorovány především otisky stop po obrábění replikovaných povrchů. Pouze řídce byly pozorovány částice kovového vzhledu fixované v povrchu replik. Vizuálně ani ve stereomikroskopu nebyly pozorovány stopy po extrakci oxidické vrstvy z pasivovaných povrchů, což potvrzuje velmi pevnou pasivační vrstvu a je indikátorem úspěšně provedené pasivace.

Destruktivní hodnocení extrahovaných vzorků impulsního potrubí

Pro laboratorní analýzu vytvořené pasivační vrstvy byly vyjmuty části impulsního potrubí, dočasně umístěného při HZ v aktivní zóně reaktoru. Použitý materiál impulsního potrubí je shodný se základním konstrukčním materiálem I.O. (ocel značky 08Ch18N10T). Vzorky byly vyjmuty ze dvou míst reaktorové šachty. Kvalita korozní pasivační vrstvy, která vznikla na vnějších površích impulsního potrubí, byla sledována a hodnocena komplexním souborem analytických metod:

- skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s EDS,
- skenovací elektronová mikroskopie s fokusovaným iontovým svazkem (SEM-FIB) s EDS a EBSD,
- transmisní elektronová mikroskopie (TEM) s EDS,
- Ramanova mikroskopie (633 nm a 532 nm),
- ESCA.

Pozorování v SEM v režimu SE ukazuje na povrchu trubek přítomnost souvislé tenké vrstvy, která kopíruje původní reliéf trubky včetně nerovností. Na tuto vrstvu nasedají zrna, která jsou omezena vlastními krystalovými tvary, které byly určeny jako magnetit. Při dokumentaci povrchu vzorků byly odhaleny nerovnosti povrchu trubek v podobě důlků, vrypů a rýh. Bylo potvrzeno, že souvislá oxidická vrstva se tvoří i v místech těchto povrchových vad.

Pro umožnění studia pasivační vrstvy v příčném řezu byly prostřednictvím techniky FIB-SEM připraveny vzorky ve formě tenké lamely pro analýzu EBSD. Ze snímků řezu kolmého k původnímu povrchu vzorku je vidět, že pasivační vrstva je komplexní, tvořena dvěma druhy oxidů. Tloušťka této komplexní vrstvy je kolísavá, průměrně se pohybuje mezi 1–2 μm . Vrstva souvisle pokrývá povrch oceli, na žádném z obou analyzovaných vzorků nebyl pozorován kov přímo exponovaný na povrchu. Hranice vnitřní oxidické vrstvy se základním materiálem je zvlněná. Spodní (vnitřní) oxidická vrstva vznikající topotaktickou přeměnou povrchu oceli částečně kopíruje původní reliéf povrchu oceli daný finálním mechanickým opracováním hodnocené komponenty. Oxidická fáze vnitřní vrstvy zaplňuje drobné nerovnosti ocelového povrchu. Hranice spodní vrstvy s vnější oxidickou vrstvou je tak rovná a velmi pravidelná. Vrchní oxidická vrstva je tvořena nárůsty krystalů, na vnějším povrchu omezených dokonale rovnými plochami.

Analýza pomocí TEM potvrzuje kompaktní charakter oxidické vrstvy, která nasedá na základní materiál. Spodní vrstva je tvořena nanokrystalky strukturně odpovídajícími Fe-Cr-Ni spinelidu v amorfni matrici, vrchní vrstva je tvořena jednotlivými krystaly magnetitu Fe_3O_4 .

Ramanova mikroskopie při obou vlnových délkách potvrzuje výskyt spinelové struktury Fe_3O_4 , výskyt grafitického uhlíku, coby nečistoty na povrchu, a výskyt spinelové struktury MexFeyO_4 případně FeCr_2O_4 .

Výsledky Ramanovy spektrometrie byly potvrzeny i analýzou pomocí ESCA, kdy i pomocí XPS stanoven uhlík, který byl přítomen na površích dodaných vzorků. S postupem délky odprašování jeho koncentrace klesala. Z výsledků lze usuzovat, že přítomnost uhlíku je ve formě nečistot. Naopak, s postupem délky odprašování narůstal obsah železa – chromu – niklu, což ukazuje na přítomnost spinelidů.

Závěry

V průběhu pasivace povrchů 3. bloku elektrárny Mochovce plánovaně vznikla na vnitřních površích pasivační (též korozní) vrstva, jež se skládala ze dvou podvrstev. První z nich vznikla difúzními procesy ze základního materiálu a je obohacena o prvky chromu a niklu, které mají ochranný (pasivační) charakter. Druhá vrstva byla složena převážně ze spinelidu magnetitu – Fe_3O_4 . Tato druhá vrstva vznikla rekrystalizací z vodního roztoku. Obě tyto vrstvy se od sebe odlišují charakterem, složením a v neposlední řadě morfologií. Tato struktura pasivační vrstvy odpovídá požadovanému stavu.

Závěrem lze říci, že IV. podetapa horkých hydrozkoušek – pasivace povrchů primárního okruhu 3. bloku elektrárny Mochovce proběhla úspěšně a splnila svůj účel. Během 13 dní, kdy povrch byl v kontaktu s vodou při parametrech blízkých ($260\text{ }^\circ\text{C}$ a $12,2\text{ MPa}$), byly udrženy podmínky pro tvorbu pasivační vrstvy. Drobné odchylky od doporučených chemických parametrů, ke kterým v průběhu pasivace došlo, byly včas korigovány a neměly vliv na výslednou vrstvu, což bylo potvrzeno analýzami této vzniklé vrstvy několika nezávislými metodami. Lze očekávat, že v budoucnu bude takto vytvořená vrstva chránit základní materiál a bude pozitivně ovlivňovat intenzitu tvorby radiačních polí a radiační situaci v okolí komponent a zařízení I.O.

MODULÁRNÍ MANIPULÁTOR ILJA PRO VIZUÁLNÍ INSPEKCI

VISUAL INSPECTION MODULAR MANIPULATOR ILJA

Jindřich Jansa a Jiří Kanta

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Je představena nová modulární platforma mobilního robotického manipulátoru vyvinutá Centrem výzkumu Řež. Manipulátor je určen pro provádění vizuálních inspekcí těžce přístupných nebo nebezpečných prostorů. Nabízí průzkum podzemních šachet a kanálů, závalů a trosek; v průmyslu dále nepřímou vizuální prohlídku kovových konstrukcí typu potrubí technické vody důležité v elektrárnách a vypuštěných kalových nádržích na indikace typu koroze, opotřebení, vruby a cizí tělesa. Všechny tyto činnosti, obvykle vyžadující celou sadu podobných přístrojů, je možné jedním manipulátorem provádět díky modulární koncepci. V základní konfiguraci jde o pásové vozidlo vybavené kamerou, jejíž obraz je přenášen v reálném čase. Podvozek je měnitelný, aby bylo možné zajistit pohyb po různých površích (pásové přizpůsobené pro hladké i sypké terény, magnetický podvozek). Základní jednotka obsahující kameru, motory pohonu a řídicí elektroniku je dále vybavena rozhraním pro připojení dalšího volitelného příslušenství a tím přizpůsobení stroje k rozličným úkonům i nad rámec vizuální inspekce. Šasi manipulátoru je voděodolné a pevné pro operace v nehostinném prostředí.

Abstract

A new modular mobile robotic manipulator platform developed by the Research Centre Rez is introduced. The device is intended for visual inspection of hardly accessible and possibly dangerous areas. It offers exploration of underground shafts, ducts, cave-ins and ruins; for industry also indirect visual inspection of metal constructions such as essentials service ware pipes in power plants and empty sludge tanks for these types of indications: corrosion, wear, dents and foreign bodies. Those assessments, usually utilizing a whole set of similar devices, are available owing to the modular approach to the design. In the basic setup it is a belt crawler equipped by video camera with real time video streaming. The undercarriage is interchangeable for the sake of providing movement on various surfaces (different crawler belts optimized for glassy and for loose terrain and magnetic wheels). The main unit consisting of motors, controlling electronics and video camera is also equipped with interfaces for attaching optional accessories, thus customizing the unit to various tasks beyond the visual inspection. The frame of the manipulator is water resistant and sturdy to operate in unfriendly environment.

Motivace a prostředí

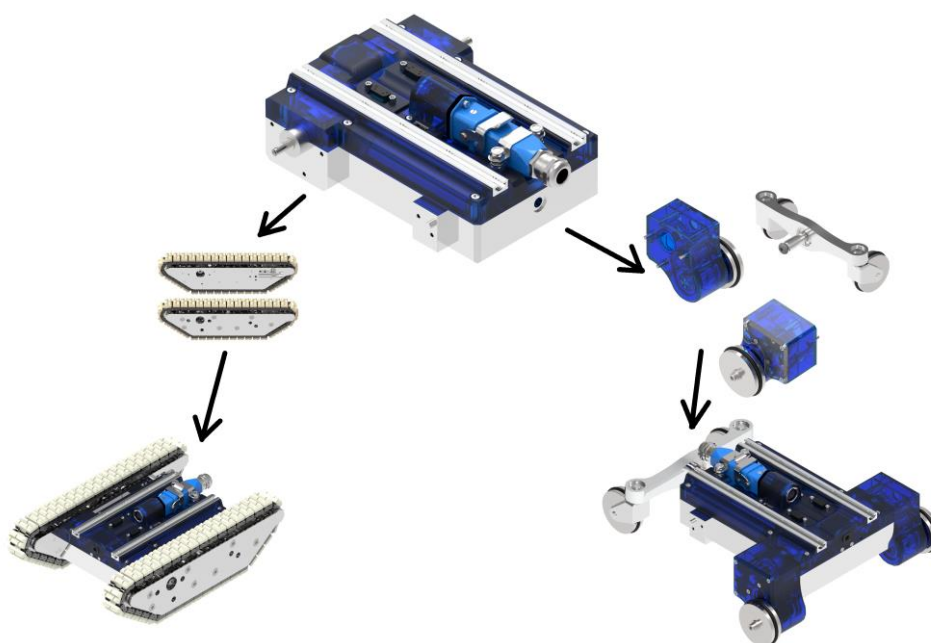
Původním impulsem k vývoji byl požadavek archeologa Muzea v Karlových Varech na zařízení, kterým by bylo možné provádět průzkum obtížně přístupných podzemních prostorů. Kvůli obtížnému přístupu totiž tyto zajímavé archeologické situace unikají dalšímu zkoumání. K řešení tohoto úkolu bývají často využívány prostředky zemní radar a gravimetrické metody. Tyto způsoby jsou však náročné časově i finančně ale zejména poskytují jen velmi omezené výstupy ve srovnání s vizuálním průzkumem. Použití, byť jednoduchého, robotického průzkumníka se tak jeví jako rozumné řešení, které umožní získat dostatečné množství dat.

Výše uvedený požadavek lze realizovat malým vozidlem s připojenou kamerou. Ve své podstatě jde o endoskop s vlastním pohonem. Pro co nejlepší prostup šachtami je vhodný pásový podvozek a konstrukce vozidla by měla být co nejodolnější z důvodu možného pádu nebo i zavalení a alespoň do jisté míry voděodolná. Vzhledem k operaci v úzkých podzemních prostorech s nedefinovaným tvarem i materiály, případně možnými zdroji rušení, je preferováno ovládání po kabelu před bezdrátovým.

V dané době takovým manipulátorem naše organizace nedisponovala a došlo k rozhodnutí naše portfolio v této oblasti rozšířit. Vývoj nebo investice do jednoúčelového nástroje se nejevila dostatečně opodstatněná, a tak byla upřednostněna stavebnicová koncepce, kterou by bylo možné používat jako základ pro řešení i dalších úloh s předpokladem, že tento přístup později urychlí a zlevní vývoj podobných zařízení díky tomu, že základní funkční bloky již budou hotové a snadno konfigurovatelné. Na trhu je k sehnání velké množství robotických manipulátorů určených k inspekci včetně zařízení určených konkrétně k průzkumu šachet a potrubí [1], [2], [3], [4] a [5]. Tyto stroje jsou konstruovány velmi odolně a obecně dosahují velmi obdivuhodných vlastností. Avšak v době započetí prací nebyl dostupný žádný, který by byl zároveň malý, odolný a přizpůsobitelný různým úkonům. Vždy byly splněny nejvýše dva z těchto požadavků, ačkoliv v době přípravy tohoto příspěvku je již k dostání velmi komplexní systém malých modulárních manipulátorů pro inspekci a drobné úkony: Multi-Mission Modular (IM3™) [6], tedy zařízení přímo konkurující našemu.

Modularita systému

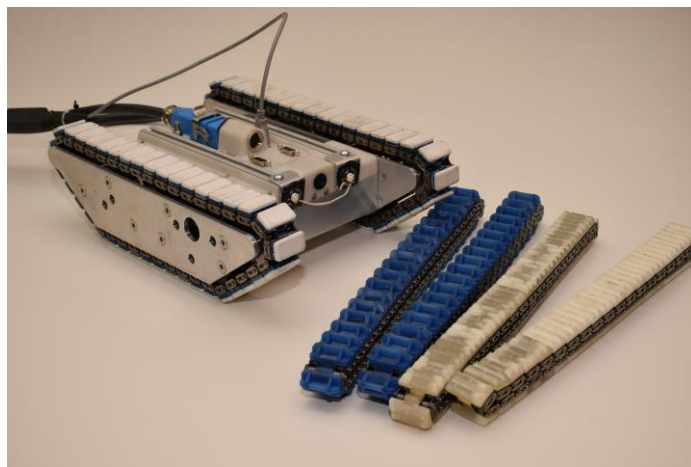
V základní konfiguraci je Ilja pásové vozidlo o vnějších rozměrech 350x250x105 mm se světlou výškou 30 mm vybavené kamerou (obr. 1 vlevo dole a obr. 2). Takto může vykonávat své původní zaměření: prozkoumávat kanály, šachty a jiné úzké prostory nepřístupné lidským pracovníkům. Podvozek je možné osadit různými typy pásů. Kromě základního typu pro pohyb po suti jsou k dispozici pásy s měkkými články pro hladký povrch a pásy s výraznějším profilem článku pro pohyb po sypkém povrchu (všechny dostupné typy pásů jsou na obr. 2). Kromě archeologických subjektů lze potencionálně využítí nalézt například u složek záchranných sborů při průzkumu závalů a trosek. Lze také prohlížet zařízení, které je sice fyzicky přístupné, ale pro lidského pracovníka není bezpečné se k němu přibližovat.



Obr. 1: Modularita podvozku

Na obr. 1 jsou znázorněny dva dosud vyvinuté podvozkové moduly: Pásový podvozek a podvozek s magnetickými kolečky. S magnetickým podvozkem (obr. 1 vpravo dole) jsou rozměry manipulátoru 320x280x105 mm. Kolečka jsou zhotovena se silnými neodymovými magnety a mohou být dovybavena pryžovým běhounem. Poháněna jsou pouze přední kolečka

a zadní jsou uložena s volným pohybem ve třech osách. Tento pohybový modul rozšiřuje možnosti inspekce manipulátorem o pohyb po feromagnetických površích. S ním je možný vizuální průzkum kotlů, nádrží nebo vnější stěny potrubí.

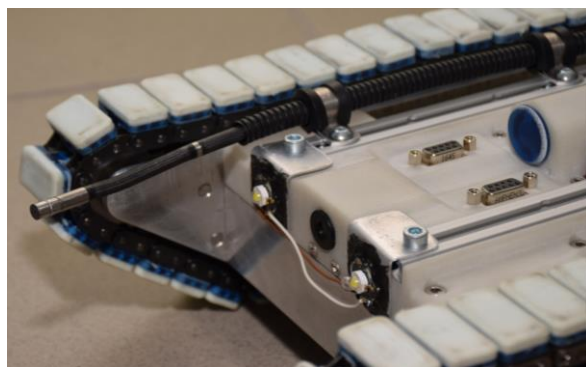


Obr. 2: Prototyp se zatím dostupnými typy pásů

V horní části obr. 2 je znázorněna základní jednotka platformy bez připojeného podvozku. Je zde vidět upínací systém, který sestává ze sesazovacího kolíku, vyvedené hřídele převodovky pohonu a slepých otvorů se závity pro přišroubování podvozkových modulů. Pro případ kolového podvozku je na zadní stěně manipulátoru navíc otvor s ložiskem pro osu vahadla s volnými kolečky.

Základním příslušenstvím připojitelným k manipulátoru je širokoúhlá kamera (s rozlišením 5 Mpx při 15 fps a samočinným zaostřováním od 10 cm) pro vizuální prohlídku. Jelikož je využívána i k samotnému navádění dálkově ovládaného robotu a bude tedy připojena vždy, je zabudována přímo v hlavní jednotce. Po obou stranách kamery jsou umístěny výkonné LED s nastavitelným jasnem pro přisvětlení snímané scény.

Pro připojení dalších modulů je víko hlavní jednotky vybaveno profilovanými lištami pro mechanické upevnění a sadou signálových a napájecích konektorů. Konektorová výbava je velmi univerzální. Vyvedeny jsou napětově stabilizované napájecí větve 5 V a 3,3 V; sběrnice USB, SPI a I2C a tři kanály analogově-číslicového převodníku. Konektivita je přístupná pro připojení vnějšího příslušenství, i pro zařízení uvnitř těla hlavní jednotky.



Obr. 3: Ilja vezoucí endoskop

Prvním hotovým volitelným příslušenstvím je jednoduché upínací zařízení pro stereoskopický endoskop Mentor Visual iQ [7] pro podrobnější inspekci do vzdálenosti 6 m od operátorského stanoviště (viz obr. 3).

Konstrukce

Hlavní jednotka obsahuje kromě výše zmíněné kamery řídicí počítač, napěťové regulátory, řízení motorů a samotné motory s převodovkami. Motory jsou dva pro nezávislý pohon levé i pravé poloviny podvozku. Skříň základní jednotky a moduly magnetického podvozku jsou zapouzdřeny na krytí dle IP54. Dno šasi je frézováno z duralu a slouží zároveň pro odvod tepla výkonových elektronických prvků. Víko je vzhledem ke své složitosti vyrobeno pomocí 3D tiskárny z plastu s příměsí skelných částic a kovové jsou pouze některé jeho konstrukční prvky. Stejnou technologií jsou také vyrobena pouzdra převodů magnetických koleček a články pásů. Články se zvýšenou přilnavostí k hladkým povrchům jsou kompozitní. S operátorským stanovištěm, které je tvořeno osobním počítačem a olověným akumulátorem pro napájení hlavní jednotky, je Ilja spojen 25m kabelem. Přípojný kabel je vyztužený a připravený posloužit i jako záchranné lano pro případ poruchy manipulátoru.

Další vývoj

V současnosti je ve vývoji rozšiřující modul měření základních environmentálních veličin, čidlo náklonu pro zlepšení prostorové orientace a robotické raménko se šesti stupni volnosti pro manipulaci s menšími předměty uvnitř prozkoumávané oblasti. Již také započaly práce na tvorbě raménka pro nesení defektoskopické sondy. Ilja potom bude moci vizuální inspekci doplnit o hledání trhlin v matriálu.

Zároveň probíhá příprava vylepšené verze základní jednotky, která bude opravovat některé nedostatky stávající verze. Při zachování konektivity s již hotovými podvozkovými moduly a příslušenstvím je hlavním cílem plně vodotěsná konstrukce pro inspekce pod vodní hladinou a prodloužený dosah ovládacího a napájecího kabelu.

Poděkování

Prototyp manipulátoru Ilja byl vytvořen s finanční podporou Technologické agentury ČR.

Literatura

- [1] *Scorpion2 and Swift* [online]. Eddyfi: ©2019 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://www.silverwingndt.com/scorpion2/>
- [2] *Identify problem pipeline areas more easily through a robotic crawler* [online]. Pure Technologies: ©2019 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://puretechltd.com/technology/purerobotics-pipeline-inspection-system>
- [3] *BIKE platform* [online]. GE Inspection Robotics: ©2019 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://inspection-robotics.com/bike-platform>
- [4] *Venrobot* [online]. Wicron [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://wicron.com/en/projects/venrobot>
- [5] *Pipe Crawler STORMER S3000* [online]. Medit Inc.: ©2017 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://www.fiberscope.net/pipe-crawler-robot-stormer.html>
- [6] *OnSite Standard Products* [online]. Inuktun Services Ltd: ©2018 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <http://inuktun.com/en/products/onsite-standard-products>
- [7] *Mentor Visual iQ Videoprobe™* [online]. General Electric: ©2019 [cit. 14. 8. 2019]. Available on: <https://www.industrial.ai/inspection-technologies/remote-visual-inspection/video-borescopes/mentor-visual-iq-video-borescope>

ZOBRAZENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY OCELI ČSN 416236 Z ROTORU PARNÍ TURBÍNY IN-SITU V ŘEM

SEM IMAGING OF IN-SITU TENSILE TESTING OF STEAM TURBINE ROTOR STEEL CSN 416236

Martin Bystrianský, Zbyněk Bunda, Václav Mentl, Josef Volák a Ludmila Kučerová
Regionální technologický institut, Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt

Byla provedena in-situ zkouška tahem oceli 27CrNiMoV v komoře elektronového rastrovacího mikroskopu za použití deformačního stolku. Ocel 27CrNiMoV (ČSN 416236) se používá pro rotory parních turbín. Během experimentu byla zkoumána deformace a tvorba a šíření trhlin. Z oceli byly připraveny malé ploché vzorky (45 x 10 x 1,5 mm, s počáteční měřenou délkou 25 mm), ve tvaru kosti. Materiál v počátečním stavu obsahoval vysoký počet defektů ve formě mikrotrhlin.

Při tahových zkouškách bylo provedeno srovnání chování vzorků bez viditelné vady a vzorků s trhlinou v těle vzorku. Přítomnost vady v počátečním stavu zjevně ukázala přímý vliv na vlastnosti materiálu, jako je nižší pevnost v tahu. Vzorek, jeho zúžení v testované části (tvorba krčku) a šířící se trhlina jsou zobrazeny v různých fázích tahového zatížení. Při testování in-situ je možno pozorovat rozdíly v deformaci vzorku.

Vzorek bez vad je ovlivněn v celém těle a lze pozorovat správné zúžení, zatímco přítomnost trhliny ve vzorcích vady soustředí napětí na menší plochu a také změnilo tvar křivky napětí-prodloužení.

Abstract

In-situ tensile testing of a 27CrNiMoV alloy which is used for steam turbine rotors was carried out using scanning electron microscope (SEM). Deformation and crack formation and propagation was examined using this test. Small (45 x 10 x 1,5 mm, with gauge length 25 mm), flat samples based on dog-bone shape were prepared from the steel. The material in its initial state contained big number of defects in form of microcracks.

A comparison of behavior at tensile tests of samples without visible defect and with crack in the gauge section was performed. Apparently, the presence of defect in the initial state showed direct influence on properties like lower tensile strength. The sample, its necking and propagated crack is displayed at different stages of the tensile load. In-situ testing reveal differences in the sample deformation. The defect-free sample is affected in its whole body and proper necking can be observed, whereas the presence of the crack in the defect samples concentrates stress to a smaller area and also changed the shape of the stress-strain curve.

Úvod

Chování součástí obsahujících trhliny je v dnešní době často popisováno pomocí parametrů lomové mechaniky. Tyto parametry, např. faktor intenzity napětí atd., popisují konečnou fázi životnosti součástí, ale nepopisují chování materiálu mezi zahájením trhliny a konečným lomem. To lze popsat pomocí tahových zkoušek využitím normalizovaných a miniaturních zkušebních vzorků, které mohou být vyrobeny zanalyzovaného materiálu.

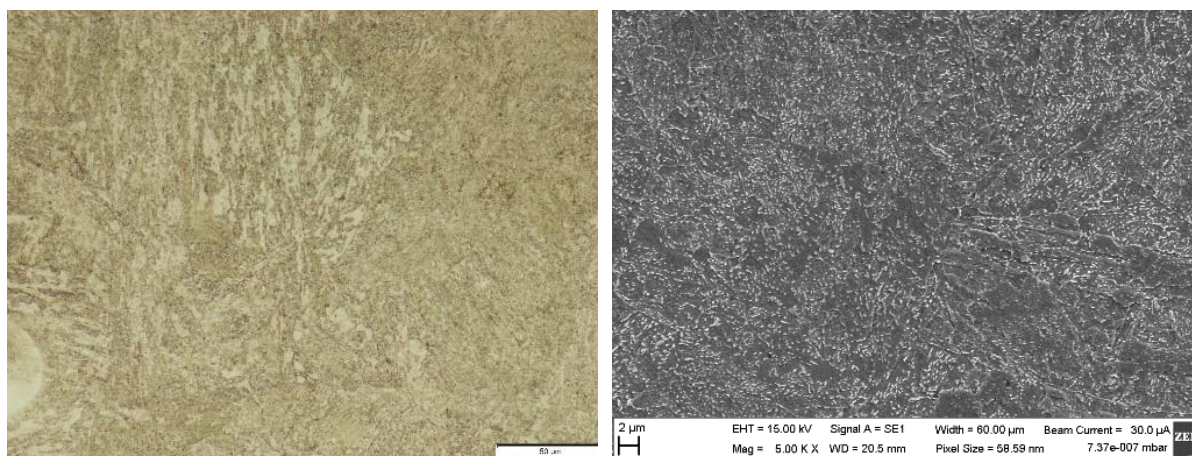
Ocel 27CrNiMoV (ČSN 416236) byla použita pro výkovky vysokotlakých rotorů parních turbín značky Škoda. Zkušební vzorky použité v tomto článku byly vyřezány z CT vzorků, ve kterých byla nakmitaná trhlina, ale nebyly použity pro zkoušky lomové houževnatosti. Bylo možné vyrobit mini tahové vzorky obsahující trhliny. Díky tomu bylo možné porovnat chování oceli při zkouškách tahem miniaturních zkušebních vzorků s prasklinami a bez nich.

Materiál

Pro tento experiment byla použita nízkolegovaná ocel 27CrNiMoV (ČSN 416236), která se používá pro rotory parních turbín. Chemické složení této oceli je uvedeno v tab. 1, mikrostruktura je na obr. 1. Zkouška tahem proběhla přímo v komoře řádkovacího elektronového mikroskopu na speciálním deformačním stolku. Výhoda tohoto in-situ experimentu je v možnosti přerušit zatěžování vzorku a následně pokračovat v experimentu. Pomocí analýz při postupném tahovém zatížení je možné pozorovat změny a reakce vzorku v různých fázích křivky napětí – prodloužení [1].

Tab. 1: Chemické složení experimentálního materiálu

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
0,3	0,5	< 0,1	1,0	0,6	0,8	0,2



Obr. 1 Bainitická mikrostruktura testovaného materiálu: světelný mikroskop (vlevo), řádkovací elektronový mikroskop (vpravo)

Z CT tělesa byly odříznuty plechy, ze kterých byly následně vodním paprskem vyříznuty vzorky o velikosti 45 x 10 mm. Tloušťka vzorků po vyříznutí vodním paprskem byla 1,8 mm. Vzorky byly poté broušeny a leštěny na standardní metalografické brusce a leštičce na finální tloušťku 1,5 mm. Před analýzou v řádkovacím elektronovém mikroskopu byly vzorky naleptány leptadlem Nital 3 % [1].

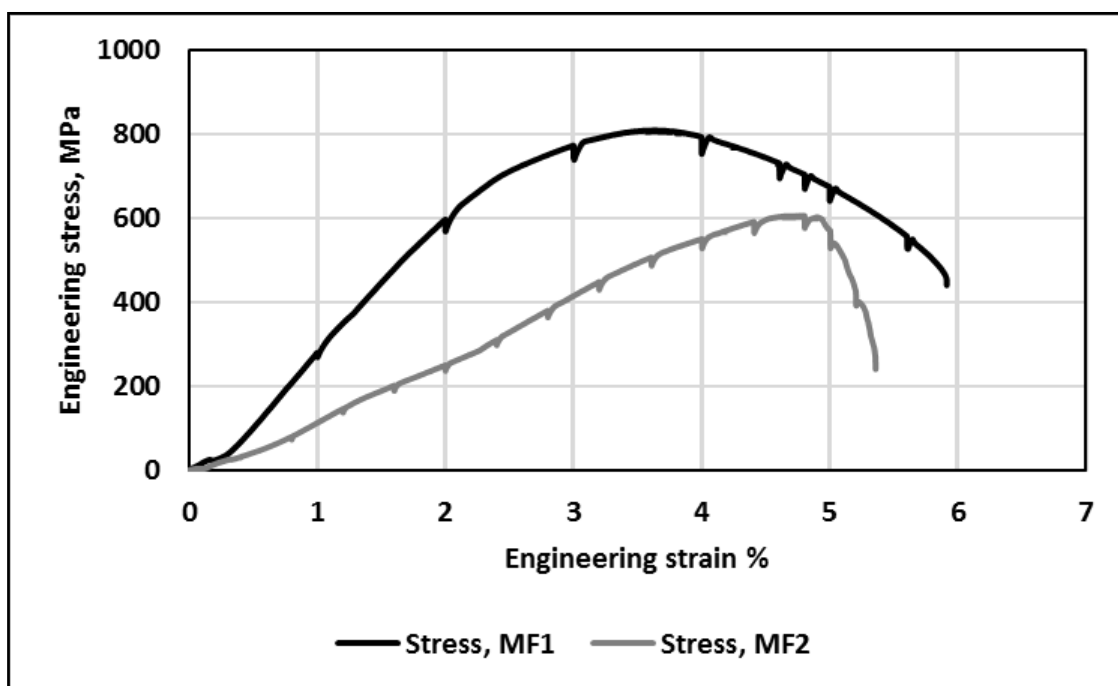
Při tahovém zkoušení na speciálním deformačním stolku byly porovnávány vzorky s přítomností trhlín ve zkoušené části vzorku a vzorky bez trhlín.

Pro zkoušení byl použit in-situ deformační stůl MTII/Fullam SEM Tester 1000 EBSD, který je kompatibilní s elektronovým mikroskopem SEM EVO MA25, Carl Zeiss (GmbH, Germany). Deformační stůl umožňuje testování vzorků v rozsahu síly až do 4500 N při deformační rychlosti 0,02 – 2 mm/min [2].

Samotné experimenty byly prováděny s konstantním zatížením s pauzami pro analýzy až do přetržení vzorku.

Výsledky

Na obr. 1 jsou porovnány dva grafy vzorků: MF1 (vzorek bez trhliny) a MF2 (vzorek s trhlinou). Je zde patrné rozdílné chování vybraných vzorků. Na křivkách jsou patrné poklesy v místech, kde byl test přerušen pro analýzu mikrostruktury.

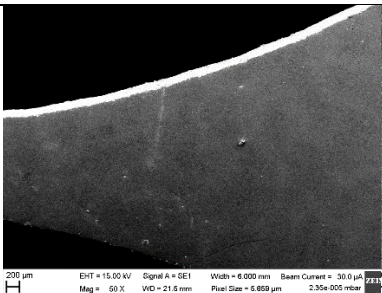
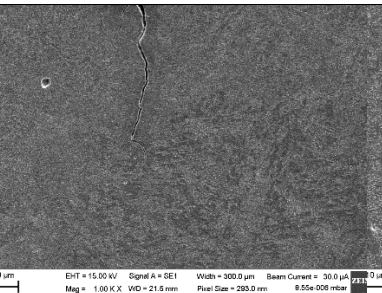
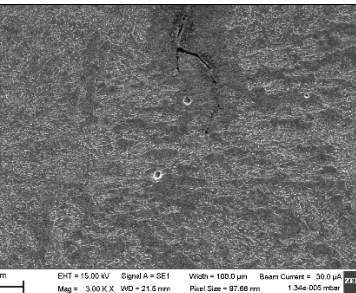
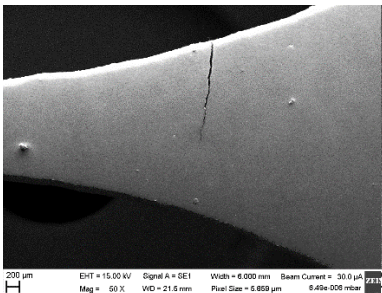
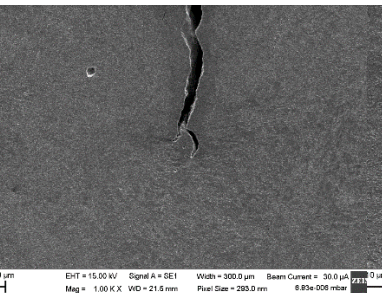
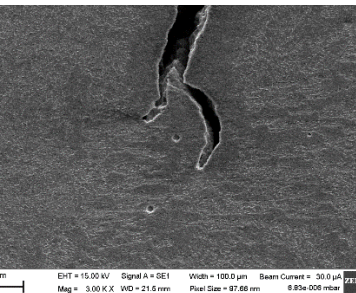
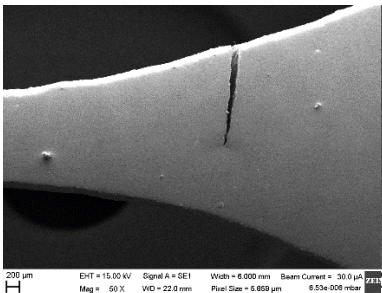
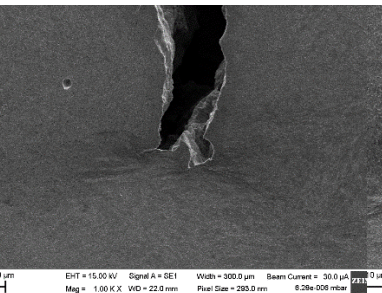
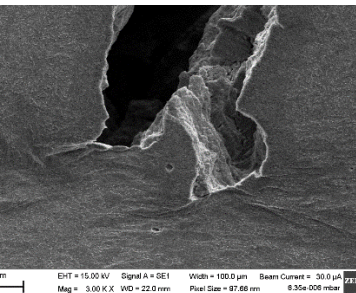
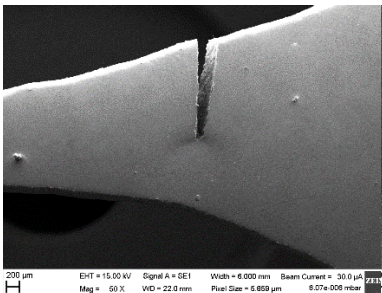
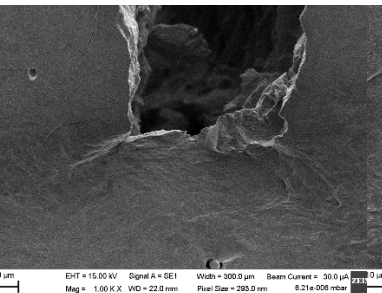
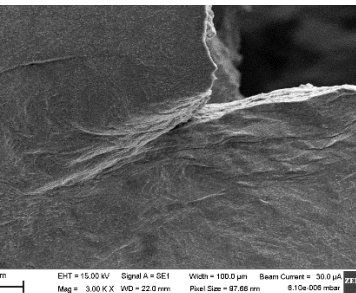
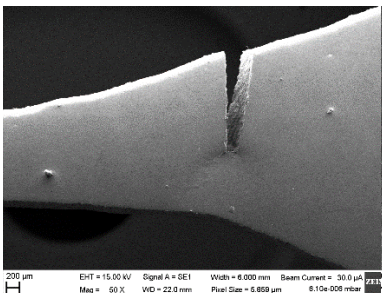
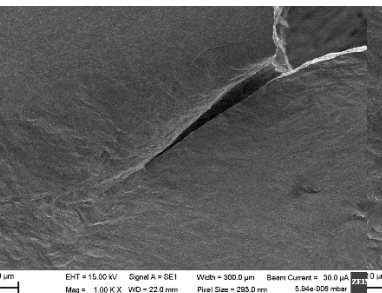
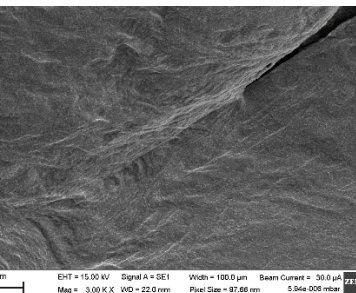


Obr. 2: Stress-strain křivky vybraných vzorků MF1 (bez trhliny) a MF2 (s trhlinou)

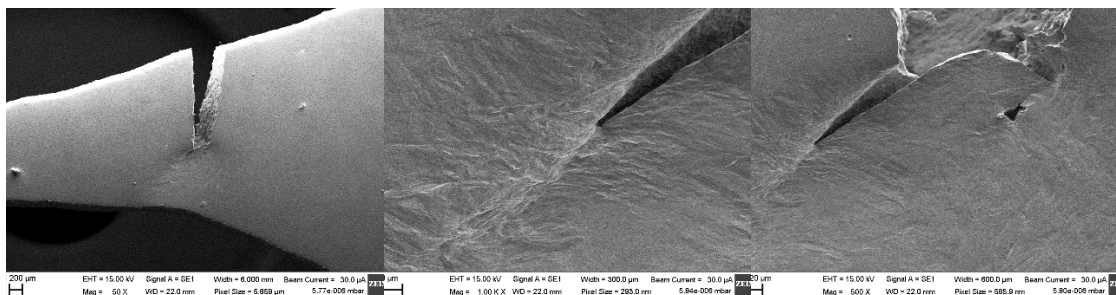
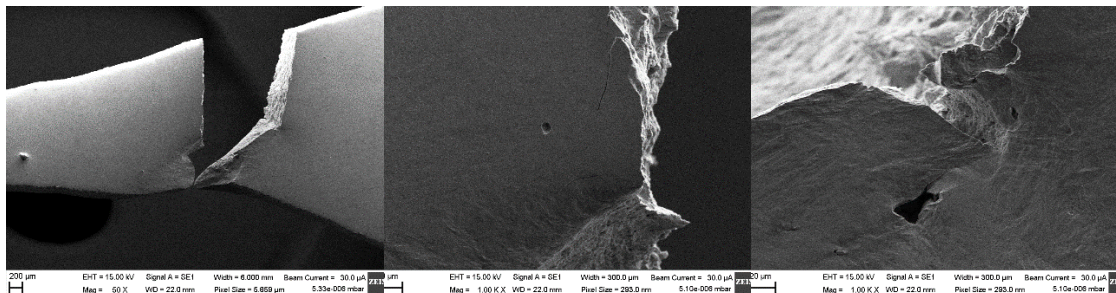
Tab. 2 ukazuje některé lokality na dvou vzorcích MF1 a MF2. V tab. 2 je vývoj tahové zkoušky pro vzorek MF1 bez defektu. Je patrné klasické zúžení zkušební tyče při tahové zkoušce s rovnoměrným rozložením napětí v celém průřezu vzorku. I když lokálně existují oblasti, které jsou ovlivněny více než jiné, dochází k deformaci rovnoměrně v celém vzorku.

Přítomnost trhliny však vede k odlišnému chování během tahového zatížení vzorku MF2. V prvních fázích experimentu není vidět žádná deformace struktury, lze pozorovat pouze otevření trhliny. Deformace se objevila při prodloužení 4,5 % a k destrukci vzorku došlo při deformaci 5,4 %. Zatímco u vzorku MF1 se deformace začala projevovat při prodloužení 3 % a lomu došlo při prodloužení 6 %. Příklad mikrostruktury vzorku MF2 je uveden v tab. 2 [1].

Tab. 2: Vzorek MF2 s trhlinou, v jejímž čele se koncentruje napětí – přehled vývoje mikrostruktury v závislosti na zvyšující se deformaci

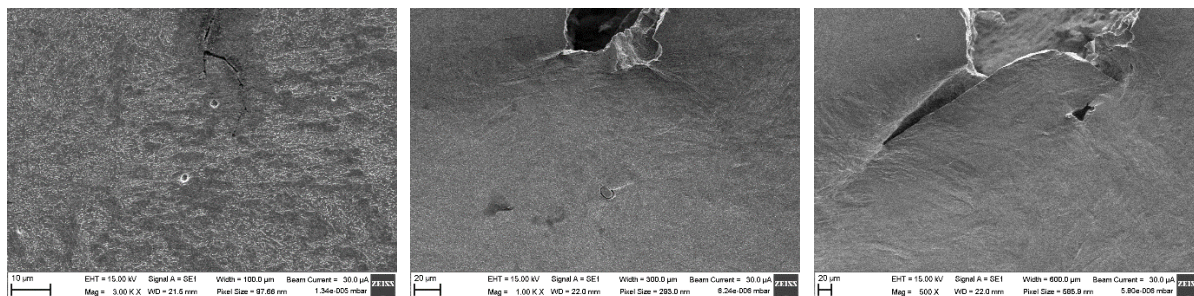
Def %	Vzorek	Trhlina	Detail struktury
0			
2,8			
3,6			
4,5			
4,8			

5,0

5,4
Lom

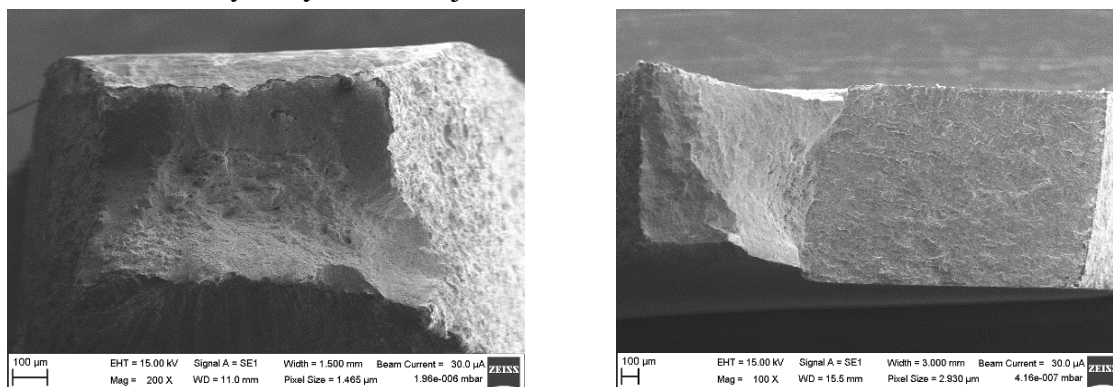
Experiment na vzorku MF2

U vzorku MF2 byla pozorován také vliv přítomnosti částic v materiálu na průběh šíření trhliny. Na začátku testování byla nalezena karbidická částice přibližně 70 μm vzdálena od špičky trhliny (ve směru trhliny). Konec trhliny byl rozdělen do dvou větví, z toho jedna byla hlavní větev šíření trhliny až do deformace 4,6 %, kdy dosáhla zmíněné částice. Šíření trhliny se v této větvi zastavilo. Dále se trhlina začala velmi rychle šířit druhou větví [1].



Obr. 3: Rozvětvená trhlina: a) před testováním, b) při deformaci 4,0 %, c) při deformaci 4,8 %

Porovnání lomů vybraných vzorků je na obr. 4.



Obr. 4: Lomy vybraných vzorků MF1 (vlevo) a MF2 (vpravo)

Závěr

Příspěvek se zaměřuje na chování nízkolegované bainitické oceli 27CrNiMoV (CSN 416236) při zkoušce tahem. Experiment byl proveden v komoře řádkovacího elektronového mikroskopu na in-situ deformačním stolku. To umožňovalo přerušování tahové zkoušky pro analýzu vzorku. Díky vyříznutí vzorků z nakmitaného CT tělesa bylo možné získat také vzorky z oblastí, kam zasahovala trhlina. Bylo provedeno porovnání chování vzorků bez trhlín a vzorků, kde byla přítomna trhlina. Zatímco vzorky bez trhlín, vykazují při tahovém zatížení zužování zkušební tyče (tvorba krčku) a deformace v začátku zatěžování probíhá rovnoměrně v celém průměru vzorku, defekty ve vzorcích s trhlinou působí jako koncentrátoři napětí, kde se deformace začíná objevovat při dostatečném otevření trhliny.

U experimentu s vzorkem s trhlinou MF2 došlo k zajímavému uvolnění napětí na vzorku s rozvětvenou trhlinou. Obě větve trhliny se začaly otevírat současně, do doby, dokud jedna z větví nedosáhla lokality, kde se šíření trhliny zastavilo na karbidické částici. Následně se trhlina začala velmi rychle šířit druhou větví.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu LO1502 Rozvoj Regionálního technologického institutu podpořeného programem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy na podporu výzkumu, experimentálního vývoje a inovací Národní program udržitelnosti I („NPU I“).

Literatura

- [1] Bystrianský, M., Kučerová, L., Bunda, Z. (2019): SEM paging of in-situ tensile testing of 27CrNiMoV steel. *Abstract booklet of 17th International Symposium on Metallography, Fractography and Materials Science*, Technical University of Košice, Nový Smokovec, High Tatras (Slovakia). ISBN 978-80-553-3285-7
- [2] Kučerová, L., Bunda, Z., Procházka, J. (2017): *Preparation of Samples for In Situ Deformation Testing and Analysis of Microstructure Development*. Materials Science Forum, Metallography XVI, Vol. 891, pp. 95-100. ISSN 0255-5476

NÁVRH OPTIMÁLNÍHO REŽIMU ŽÍHÁNÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440 PRO ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU

DESIGN OF OPTIMAL THERMAL ANNEALING REGIME OF WWER-440 INTERNALS FOR PROVIDING A LONG-TERM OPERATION

Ivana Eliášová ^{a)}, Petra Klatovská ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Dana Tonarová ^{a)} a Aleš Materna ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

Vnitřní části reaktorů nejsou monitorovány programy svědečných vzorků, jako je tomu v případě tlakových nádob reaktorů. Stupeň degradace materiálů VČR se převážně odhaduje na základě literárních údajů ze zkoušek podobných materiálů, případně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře nebo výpočetních postupech a normách. Materiály komponent vnitřních částí reaktorů jsou navíc vystaveny významně intenzivnějšímu toku neutronů než tlaková nádoba reaktoru. Regenerační žíhání může být jedním z možných řešení pro obnovu výchozích mechanických vlastností komponent vnitřních částí reaktorů a může tak přispět k dlouhodobému provozu jaderných elektráren. Příspěvek obsahuje dosavadní výsledky projektu TH02020565 „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren”.

Abstract

The reactor pressure vessel internals are not monitored by surveillance program. The degree of material degradation reactor pressure vessel internals is estimated on literature data from tests of similar materials, or from predictive relationships reported in literature, or calculation procedures and standards. The materials of reactor pressure vessel internals are exposed to significantly more intense neutron flux than the reactor pressure vessel. The thermal annealing can be one of the possible solutions to re-establish initial mechanical properties of reactor pressure vessel internals and thus can contribute to long term operation of nuclear power plants. This paper includes results obtained within the project TH02020565 “*Assurance of Safe and Long-Term Operation of Nuclear Pressure Vessel Internals*” which is realized by ÚJV Řež, a. s. in cooperation with Czech Technical University in Prague, FNSPE, in the period from 2017 to 2020 with the support of Technology Agency of the Czech Republic.

Úvod

Pro prodloužení životnosti materiálů tlakové nádoby reaktoru typu VVER-440 byla již v minulosti na několika jaderných elektrárnách úspěšně aplikována technologie regeneračního žíhání, která slouží k významnému obnovení výchozích vlastností a tím i k podstatnému prodloužení životnosti. Při ozařování kovových materiálů neutrony, elektrony, ionty nebo γ -zářením dochází ke změnám jejich struktury. Interakcí dopadajících částic o dostatečně vysoké energii s atomy krystalové mřížky dochází ke vzniku bodových poruch, tj. vakancí a intersticiálů. Tyto procesy jsou doprovázeny vznikem charakteristických mřížkových poruch, které degradují užitečné vlastnosti materiálu. Mřížkové poruchy vyvolávají změnu mikrostruktury, mechanických a mechanicko-korozních vlastností ozařovaného materiálu. Radiační poškození je souhrnem všech změn vlastností materiálu vlivem ozáření a je důležitým kritériem bezpečnosti provozu jaderného zařízení. Nejdůležitější změnou ozářené mikrostruktury u austenitu používaného pro vnitřní části jaderných reaktorů typu VVER-440 je tvorba Frankových dislo-

kačních smyček a vrstevních chyb. Protože jsou dislokační smyčky častěji tvořeny intersticiálními atomy než vakancemi, mají silný vliv na rozvoj radiačně poškozené mikrostruktury. U ozářených materiálů dále rostoucí koncentrace vakancí umožňuje šplhání dislokací za nižších teplot. Vnitřní části reaktoru jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli stabilizované titanem 08Ch18N10T. Kromě výše zmíněných degradačních mechanismů dochází u austenitických ocelí ještě k radiačně indukovanému koroznímu praskání pod napětím (IASCC), které nastává při souběžném působení radiace a agresivního chemického prostředí primárního okruhu (demineralizovaná voda s H_3BO_3 , KOH a NH_4OH) [1, 2, 3].

Experimentální materiál

Pro potřeby řešení projektu má hlavní řešitel projektu ÚJV Řež, a. s. k dispozici neozářenou korozivzdornou austenitickou ocel 08Ch18N10T (chemické složení je uvedeno v tab. 1 a tab. 2) a ozářenou korozivzdornou austenitickou ocel 08Ch18N10T z uzavřené JE Greifswald (VVER-440/213), která byla 15 let v provozu (1974-1990), konkrétně se jedná o ozářený materiál z bloku I (výsledná radiační dávka je uvedena v tab. 3). Pro výrobu neozářených zkušebních těles byly použity dvě tavby experimentálního materiálu 08Ch18N10T. Dvě odlišné tavby byly zvoleny pro možnost vzájemného porovnání výsledků dosažených na vzorcích z mírně odlišného materiálu. Pro potřeby experimentu byly vyrobeny 2 sady neozářených zkušebních těles. Z neozářeného bloku 08Ch18N10T první tavby (tab. 1) byly vyrobeny zkušební tělesa s rozměrem 12x12x60 mm, z neozářeného bloku 08Ch18N10T druhé tavby byly vyrobeny zkušební tělesa s rozměrem 15x15x17 mm. Na všech zkušebních tělesech byla změřena tvrdost HV5.

Experimenty

Před samotným žíháním byla na zkušebních tělesech obou taveb austenitické korozivzdorné ocele 08Ch18N10T v neozářeném stavu změřena tvrdost HV5. K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr ZHV30 od společnosti Zwick/Roell Indentec. Tento tvrdoměr je umístěn na pracovišti hlavního řešitele projektu ÚJV Řež, a. s. v olovem stíněné polohorké komoře laboratoře oddělení Mechanické vlastnosti. Pro žíhání zkušebních těles byly vybrány následující žíhací režimy: 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C. Parametry žíhání: ohřev na teplotu: 10 °C/hod, výdrž na teplotě – 6 hodin, ochlazování zkušebních těles probíhalo v uzavřené peci. Po žíhání byla na zkušebních tělesech změřena tvrdost HV5. Výsledky zkoušek tvrdosti pro obě zkušební tavby neozářeného materiálu 08Ch18N10T jsou uvedeny v tab. 4 a tab. 5 a graficky znázorněny na obr. 1. Pro potřeby stanovení optimálního žíhacího režimu pro ozářené materiály byly spoluřešitelem projektu ČVUT FJFI provedeny doplňkové žíhací režimy při teplotě 550 °C a 600 °C s výdrží na teplotě 1, 2, 4 a 6 hodin, chlazení zkušebních těles probíhalo v uzavřené žíhací peci. Následně byla změřena tvrdost po žíhání HV5. Výsledky jsou uvedeny v tab. 6 a graficky znázorněny na obr. 2.

Analýza materiálu 08Ch18N10T v neozářeném stavu

Z výsledku měření tvrdosti HV5 je patrné, že vlivem rostoucí žíhací teploty dochází k mírnému poklesu tvrdosti. Výjimkou je žíhací teplota 700 °C, při které se tvrdost téměř nesnížila. Z tohoto důvodu byl analyzován vliv doby žíhání při teplotě na 700 °C na tvrdost oceli 08Ch18N10T v neozářeném stavu. Tyto doplňková měření byla provedena na pracovišti spoluřešitele projektu ČVUT FJFI. Na pracovišti spoluřešitele byla pro stanovení vlivu doby žíhání na změnu mechanických vlastností materiálu (změnu tvrdosti) zkušební tělesa ponechána na požadované teplotě 700 °C po dobu: 1, 2, 4 a 6 hodin, a následně zakalena do vody. Kalení do

vody bylo zvoleno z důvodu uchování mikrostruktury v okamžiku po ukončení žíhání. Vliv doby žíhání při teplotě 700 °C na tvrdost neozářené oceli 08Ch18N10T je uvedena v tab. 7.

Dále byla provedena mikrostrukturní analýza oceli 08Ch18N10T před a po žíhání na teplotě 700 °C a též byla provedena analýza k citlivosti na mezikrystalovou korozi (MKK), tato analýza probíhala v akreditované laboratoři oddělení Podpora provozu energetických zařízení ÚJV Řež, a. s. Mikrostruktura analyzovaných vzorků byla austenitická, tvořena různě velkými austenitickými zrny s průměrnou velikostí cca 200 μm (obr. 3). Po naleptání byl lokálně patrný delta ferit. Zrna jsou v analyzovaných vzorcích rovnoosá, nejsou protažená v žádném směru. V mikrostruktuře jsou patrná menší i větší zrna (max. 720 μm). V analyzovaných vzorcích se vyskytovaly globulární karbidy o velikosti 1 μm na hranicích zrn i uvnitř zrn. Tento typ karbidů se nachází i ve výchozím stavu materiálu 08Ch18N10T, tudíž vznik těchto karbidů nelze výhradně považovat za důsledek žíhání. Dále bylo provedeno hodnocení vměstků pomocí světelné mikroskopie a následné měření chemického složení přítomných vměstků pomocí EDS (energieově disperzní spektrometrie) (obr. 4). V analyzovaném vzorku austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T se vyskytovaly 3 typy vměstků: ostrohranné OV, deskovité DV, globulární GV. Distribuce vměstků byla homogenní, nebylo patrné vyšší množství u okraje nebo uprostřed vzorku. Ostrohranné vměstky byly pravidelného tvaru a vyskytovaly se ojediněle nebo ve shlucích. Deskovité vměstky se vyskytovaly ve shlucích a byly protažené v jednom směru (desítky μm), široké byly 3 μm. Globulární vměstky byly jemné, velikosti 1 μm. Tyto vměstky se vyskytovaly i v tepelně zpracovaných vzorcích, zejména na hranicích a uvnitř zrn. Z výsledku chemických analýz lze usoudit, že ostrohranné vměstky byly tvořeny pravděpodobně nitridy Ti. Deskovité vměstky se vyznačovaly poměrně vysokým obsahem síry a uhlíku. Jedná se pravděpodobně o karbosulfidy titanu $Ti_4C_2S_2$. Globulární vměstky byly nejspíše karbidy titanu TiC.

Pro analýzu vzorků k citlivosti na MKK bylo vybráno 5 vzorků z Tavby 1 (tab. 1) – jeden ve výchozím stavu a čtyři žíhané na teplotě 550 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C. Před samotnou analýzou byla provedena úprava povrchu všech zkušebních vzorků broušením na metalografickém papíře zrnitosti 1000. Expoziční část zkoušky byla provedena dle ČSN EN ISO 3651-2 metodou zkoušení v 16% roztoku kyseliny sírové/síranu měďnatém. Doba expozice byla 20 hodin. Po expozici byla tělesa příčně rozříznuta – řez probíhal kolmo k ose tváření. Mikrostruktura všech vzorků byla austenitická, hranice zrn byly po leptání zvýrazněny přítomností karbidických vměstků. Vzorek ve výchozím stavu a vzorek žíhaný při teplotě 550 °C vykazovaly oba rovnoměrný povrch bez výrazného korozního napadení (obr. 5a). Na povrchu vzorků žíhaných při teplotě 600 °C, 700 °C (obr. 5b) byly místy patrné náznaky korozního napadení o maximální hloubce ~5 μm. Vzorek žíhaný při teplotě 800 °C (obr. 5c) vykazoval lokálně důlky až do hloubky ~17 μm, které byly viditelné i na dalších řezech. V okolí těchto důlků byly po naleptání patrné známky MKK.

Závěr

Cílem regeneračního žíhání je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností materiálů. Výsledky žíhání na neozářených zkušebních tělesech materiálu 08Ch18N10T (austenitická nerezivějící ocel) ukázaly, že jako ideální se pro samotné žíhání jeví teploty v rozmezí 500 °C – 600 °C. Na základě analýz a zkoušek mechanických vlastností před a po žíhání bylo zjištěno, že při žíhací teplotě 700 °C dochází k menšímu snížení hodnoty tvrdosti a k zvýšení citlivosti na MKK. Při porovnání tvrdosti HV5 a velikosti zrna (v příčném a podélném řezu) je patrný Hall – Petchův vztah (čím větší velikost zrna, tím menší tvrdost). U oceli 08Ch18N10T v neozářeném stavu žíhaném při teplotě 700 °C při výdrži 1, 2, 4 a 6 hodin s následným kalením do vody, bylo ujištěno, že z původní hodnoty HV5 176 se tvrdost po 6 hodinách zvýšila na hodnotu 200 HV5. Tento nárůst tvrdosti se nedá vysvětlit ani proce-

sem kalení, ani mechanickou úpravou měřeného povrchu (nárůst tvrdosti se projevil jak u kalených a pomalu ochlazovaných zkušebních těles, tak i u zkušebních těles s neupraveným i přebroušeným a přeleštěným povrchem po žíhání). Pravděpodobným důvodem nárustu tvrdosti může být i precipitační vytvrzení, kdy po žíhání při 700 °C vznikají ve zkoumané oceli 08Ch18N10T karbonitridy. Na základě dosažených výsledků budou pro žíhání ozářených materiálů zvoleny dvě teploty žíhání: 550 °C, 600 °C. Vývoj metodiky regeneračního žíhání komponent VČR umožní zajistit výchozí podmínky pro obnovení mechanických vlastností vysoce ozářených materiálů a tím případně prodloužit životnost důležitých součástí VČR a přispět tak k zajištění dlouhodobého a bezpečného provozu JE.

Literatura

- [1] Petelová, P., Marešová, B., Buršík, O., Kopřiva, R., Materna, A. (2018): Vývoj procesu regeneračního žíhání vnitřních částí reaktoru VVER-440 pro zajištění dlouhodobého provozu. *Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní, str. 71-74. ISBN 978-80-261-0794-1
- [2] Padilha A.F., Rios P. R. (2002): *Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels*. ISIJ International, Vol. 42, No. 4, pp. 325-337. Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559
- [3] Sourmail, T. (2001): *Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels*. Materials Science and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 1-14. ISSN 0267-0836

Tabulky a obrázky

Tab. 1: Tavební analýza materiálu 08Ch18N10T číslo 278075 s předepsanými hodnotami, tavba 1

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	Nb	N	W	Co	H
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	%	%	ppm
0,05	1,66	0,52	0,031	0,005	17,5	10,1	0,12	0,09	0,058	0,35	0,07	0,024	130	0,03	0,04	1m4

Tab. 2: Chemické složení druhé tavby materiálu 08Ch18N10T, kolektor PG z JE Greifswald – tavba 2

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Al	P	V
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,102	0,520	1,446	18,08	9,79	0,048	0,023	0,61	0,109	0,023	0,013

Tab. 3: Ozářené materiály zvolené pro řešení projektu

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

Tab. 4: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T před a po žihání, materiál první tavby

Žihací teplota								
Stav	nežiháno	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
Tvrdost HV5	181	164	164	171	161	178	163	160

Tab. 5: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T před a po žihání, materiál z druhé tavby

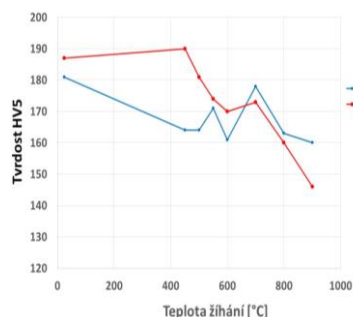
Žihací teplota								
Stav	nežiháno	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
Tvrdost HV5	187	190	181	174	170	173	160	146

Tab. 6: Výsledky měření tvrdosti HV5 na neozářených zkušebních tělesech z materiálu 08Ch18N10T po žihání, materiál z první tavby

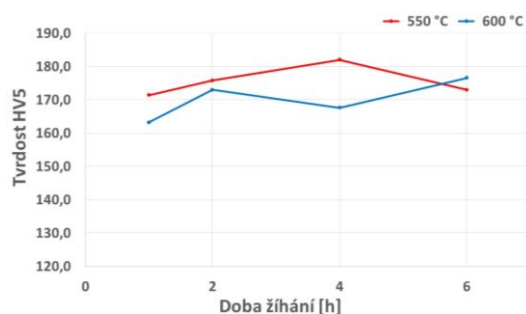
Teplota žihání	Výdrž	Tvrdost HV5	Teplota žihání	Výdrž	Tvrdost HV5
550 °C	1	171,4	600 °C	1	163,2
	2	175,8		2	173
	4	182		4	167,6
	6	173		6	176,6

Tab. 7: Vliv doby žihání při teplotě 700 °C na tvrdost neozářené austenitické nerezavějící ocele 08Ch18N10T

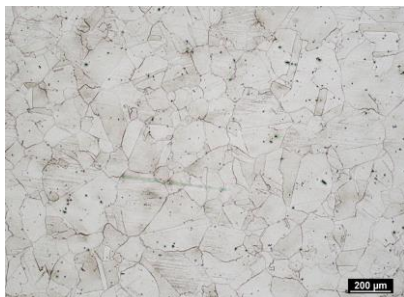
Teplota žihání	Výdrž	Tvrdost HV5
nežiháno	0	176
700 °C	1	184
	2	191
	4	190
	6	200



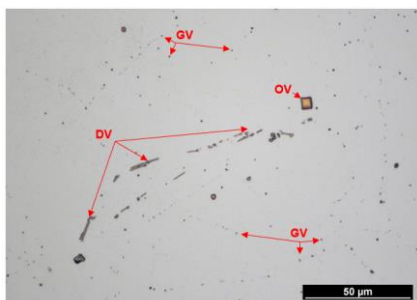
Obr. 1: Porovnání výsledků měření tvrdosti (HV5) dvou experimentálních taveb oceli 08Ch18N10T



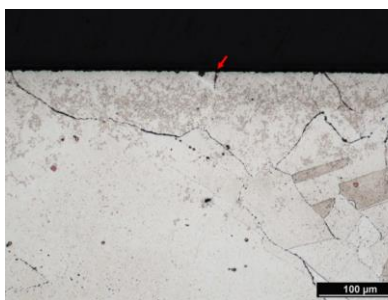
Obr. 2: Porovnání výsledků měření tvrdosti (HV5) pro teploty 550 °C a 600 °C při výdrži 1, 2, 4, 6 hod oceli 08Ch18N10T



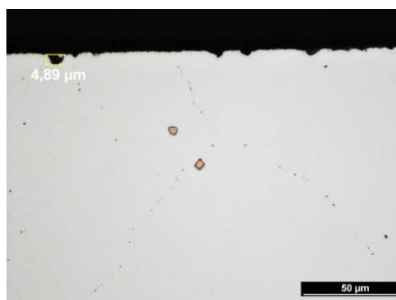
Obr. 3: Mikrostruktura austenitické nerezavějící oceli 08Ch18N10T v neozářeném stavu při různých zvětšeních (nežíháno, neleptáno)



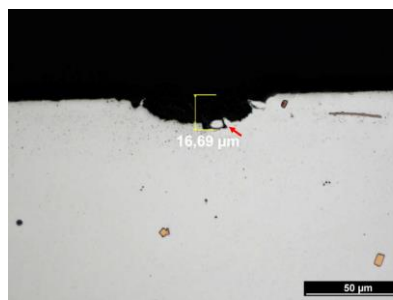
Obr. 4: Stanovení chemického složení jednotlivých typu vměstků na zkušební tělese oceli 08Ch18N10T pomocí metody EDS (energiově disperzní spektrometrie). OV – ostrohranné vměstky, DV – deskovité vměstky, GV – globulární vměstky



a



b



c

Obr. 5: Detail stavu povrchu mikrostruktury v příčném řezu žíháno při: a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C

ZAŘÍZENÍ PRO ZKUŠEBNICTVÍ V PROSTŘEDÍ TĚŽKÝCH TEKUTÝCH KOVŮ

TESTING DEVICE FOR HEAVY LIQUID METAL ENVIRONMENT

Michal Chocholoušek, Zdeněk Fulín a Zbyněk Špirit

Centrum výzkumu Řež s.r.o., Husinec-Řež

Abstrakt

V rámci projektu Udržitelné Energetiky (SUSEN) jsou plánovány zkoušky cyklické únavy a lomové houževnatosti kandidátních materiálů v prostředí těžkých tekutých kovů využívaných jako chladiva pro primární okruh reaktorů 4. Generace. Zmiňované druhy zkoušek mají mnohem vyšší požadavky na přesnost měření v porovnání s dosud provedenými zkouškami v tahu s konstantní rychlostí deformace. Pro optimalizaci prostředí těžkého tekutého kovu byla navržena zkušební komora s nucenou cirkulací a pro přesné měření v prostředí tekutého těžkého kovu byl vyvinut průtahoměr. V příspěvku je prezentován pokrok v řešení problémů zkušebního zařízení.

Abstract

In the frame of the project Sustainable Energy (SUSEN), the cycle fatigue and fracture toughness testing is prepared for the candidate materials in heavy liquid metal (HLM) environment used as a primary circuit coolant for Generation IV reactors. The mentioned types of tests have significantly higher requirements for the precise deformation measurement compared to the previously performed Constant Extension Rate Tensile tests. A testing cell with pumping circulation was developed for the HLM environment optimization and an extensometer was developed for precise measurement in HLM environment. The progress in solution of testing device issues is presented in the paper.

Úvod

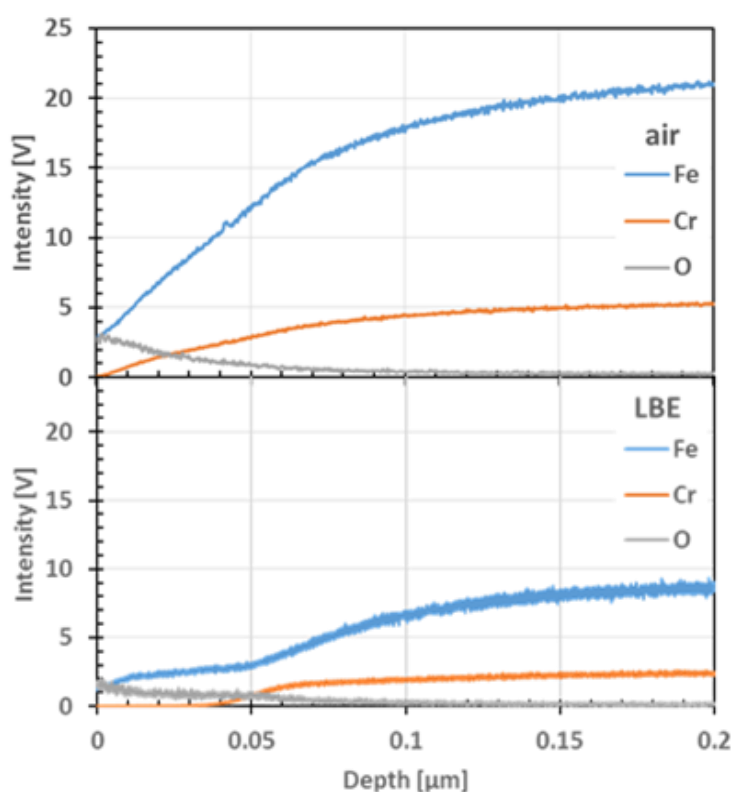
Olovem chlazené rychlé reaktory (LFR) jsou jedním z uvažovaných systémů chlazení pro primární okruhy reaktorů Generace IV. Za tímto účelem se Centrum výzkumu Řež (CVR) vyvíjí zkušební zařízení pro zkoušky v HLM, zejména v tekutém Pb a eutektiku PbBi (LBE). Toto zařízení je průběžně zlepšováno, aby bylo schopné splnit požadavky připravovaných projektů.

Problematika zkoušení v HLM zahrnuje kontrolu a udržení obsahu kyslíku v tekutém médiu na požadované hladině [1]. Velké množství kyslíku je nežádoucí vzhledem k tvorbě oxidů, které jako nečistoty mohou bránit správnému fungování systému. Malé množství naopak vede k rozpouštění oxidické vrstvy a následnému rozpouštění legujících prvků zkoušeného materiálu do tekutého média.

Složení oxidické vrstvy se s hloubkou mění vlivem zkušebního prostředí. Hloubkové profily oxidických vrstev zkoumané v CVR (obr. 1) pomocí emisního spektrometru s doutnavým výbojem (GD-OES) byly vytvořeny postupným odprašování. Intenzita prvků je přímo úměrná jejich koncentraci, avšak nenbylo možné přesně spočítat chemické složení. Vrstva vzniklá při zkoušce na vzduchu byla srovnána s vrstvou vzniklou v HLM prostředí (obě zkoušky při teplotě 400 °C). Vrstva vzniklá na vzduchu obsahuje oxidy Fe a Cr. Vrstva sice vykazuje nižší koncentraci chromu na okraji, ale to může být způsobeno zkreslením vlivem pomalejšího odprašování Cr, nikoli jeho absencí. Od hloubky 0,2 μm vrstva obsahuje železo i chrom. Oxidická vrstva je přibližně 0,14 μm tlustá. Vrstva vytvořená v LBE prostředí má odlišné složení. Nejprve je cca. 0,04 μm tlustá vrstva bez Cr. Poté koncentrace Cr roste a kyslík je stále

přítomen. Z toho vyplývá, že druhá vrstva obsahuje směs Cr-Fe oxidů. Již dříve bylo pozorováno [2], že Cr-Fe vrstvy se formují pod původním povrchem, a to difúzí atomů železa na povrch, kde vytvoří oxidickou vrstvu. Byla snaha najít korelaci mezi koncentrací kyslíku a tloušťkou vrstvy, ale hloubkové profily byly zatíženy příliš velkou nepřesností k dosažení přesných závěrů.

Z pohledu mechanického zkoušení je cílem udržení homogenního HLM prostředí s pomocí plynové regulace s cílem minimalizovat nepřesnosti koncentrace kyslíku a dosažení spolehlivých výsledků. Dalším cílem je zkoušení v HLM prostředí je přesné měření. Průtahoměry pro testování v HLM jsou nedostupné a standardní průtahoměry nejsou pro takové prostředí použitelné a hrozí jejich poškození. Používat data z měření příčnickem je postačující pro informativní měření, ale pro přesné měření při cyklických únavových testech či měření rozevření trhlin je zapotřebí in-situ průtahoměr. Proto CVR přistoupila k vývoji vlastního vybavení.



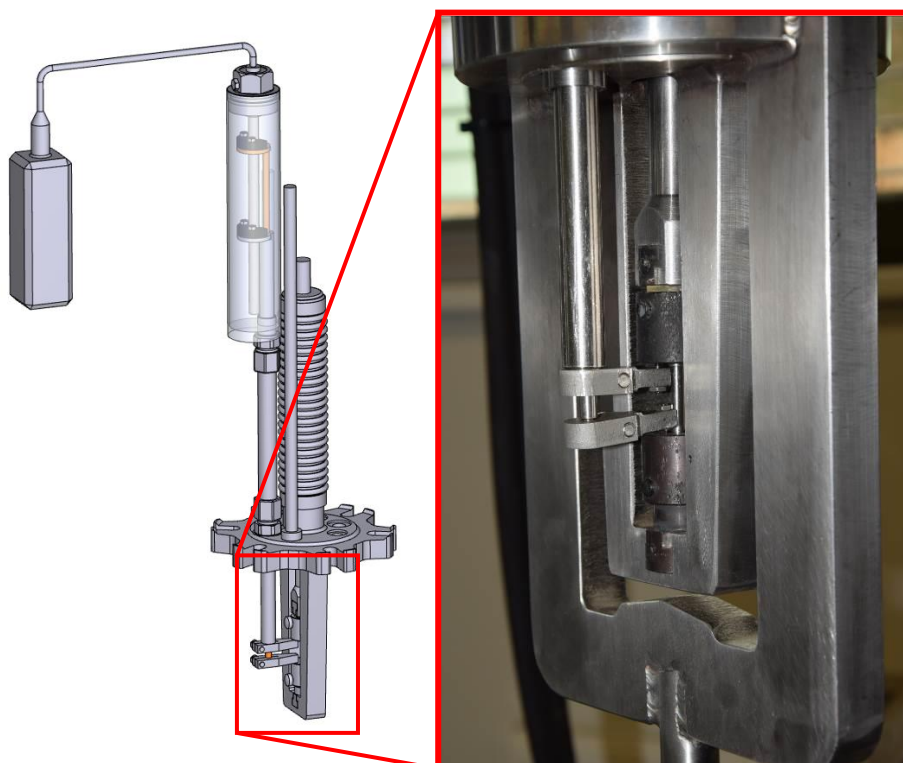
Obr. 1: Oxidické vrstvy na oceli T91 zkoumané GD-OES v CVR na vzduchu (horní) a v eutektiku PbBi (dolní). Vzhledem k nedostatku referenčního materiálu bylo nemožné přístroj kalibrovat pro provedení kvantitativní analýzy, uvedené výsledky nejsou absolutními hodnotami koncentrací

Výsledky

Zkušební systém v současnosti používaný v CVR zahrnuje zkušební celu a regulaci plynů s třemi oximetry na bázi BiO. Vstup plynu je pod úrovní hladiny HLM a pod vzorkem. Původní koncept počítá s cirkulací HLM vlivem probublávání. Měření oximetry ale ukazují na rozptyl v měření obsahu kyslíku s rostoucí vzdáleností od vzorku. K dosažení přesnějších výsledků je třeba vytvořit homogenní prostředí. Pro tento účel byla rozšířena zkušební cela o smyčku s nucenou cirkulací (obr. 2). Směr cirkulace je v uvedeném případě ze dna zkušební cely do smyčky a výstup nad hladinou HLM.



Obr. 2: Zkušební HLM komora s cirkulační smyčkou pro tekutý kov. 1 – zkušební komora, 2 – čerpadlo, 3 – pouzdro pro Mg-pásku, 4 – HLM výpust’.



Obr. 3: HLM extenzometr. Model extenzometru (vlevo), extenzometr připevněný k adaptérům pro uchycení vzorku v řezu modelu zkušební cely (vpravo).

Součástí smyčky je čerpadlo pro nucený oběh HLM. Přidanou částí je vstup pro umístění hořčikové pásky, která snižuje obsah kyslíku mnohem rychleji než používaná směs argon-

vodík. Mg-páska je ale používána jen v případě silně znečištěného HLM. Celý systém je pak uzavřen do topného boxu, aby nedocházelo k zatuhnutí HLM ve smyčce a v systému se udržovala konstantní teplota. Topení je opakovaně odnímatelné kvůli možnosti výměny Mg-pásky případnému čištění okruhu a není na obr. 2 vidět. Čerpadlo má regulované otáčky pro případné sledování vlivu průtoku HLM. Průtok HLM může mít vliv na chování materiálu, ale v tomto případě je jeho přítomnost žádoucí, protože lépe simuluje provozní podmínky.

Řešení pro HLM průtahoměr je uvedeno na obr. 3. Základní konstrukce je standardně využívaný systém „rod-in-tube“. Na rozdíl od zkoušení na vzduchu musí být systém těsný, aby udržel ochrannou atmosféru a neovlivňoval koncentraci kyslíku v HLM. Na druhou stranu musí být elektronika průtahoměru chráněna před teplem ze zkušební komory. Proto je elektronika umístěna mimo zkušební systém a uvnitř jsou umístěny pouze magnetické senzory pro měření vzájemného pohybu a tím požadované deformace. Měřicí body jsou v uvedeném případě na adaptérech držících zkušební vzorek, ale konce průtahoměru jsou modifikovatelné a mohou být uchyceny přímo na vzorek. Průtahoměr je vybaven pružinami, které způsobují malé předpětí mezi trubkou a tyčí a brání tak k nechtěnému uvolnění snímače při zkoušce. Přesnost průtahoměru je závislá na přesnosti použitých magnetických senzorů a geometrii. Pro tento účel může být průtahoměr kalibrován s použitím kalibrátoru před provedením samotné zkoušky.

Závěr

Pro dosažení homogenního prostředí těžkého tekutého kovu byla smyčka vybavena cirkulační smyčkou s možností regulace průtoku, což umožňuje zkoumání vlivu průtoku na materiálové vlastnosti. Extenzometr byl vyroben tak, aby bylo možné udržet ochrannou atmosféru a neovlivnit koncentraci kyslíku v tekutém kovu.

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108. Poděkování patří také společnosti ŠKODA JS a.s., která se podílela na vývoji a která zařízení vyrobila dle požadavků.

Literatura

- [1] NEA OECD (2015): *Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies*. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015 NEA No. 7268 ed., Issy-les-Moulineaux, France, pp. 185-200.
<http://www.oecd-neo.org/science/pubs/2015/7268-lead-bismuth-2015.pdf>
- [2] Müller, G., Schumacher, G., Zimmermann, F. (2000): *Investigation on Oxygen Controlled Liquid Lead Corrosion of Surface Treated Steels*. Journal of Nuclear Materials. Vol. 278, No. 1, pp. 85-95. ISSN: 0022-3115

REJSTŘÍK AUTORŮ

A

Adamech Marek 147

B

Bátěk David 129

Brabec Petr 141, 201, 213

Brajer Jan 171

Brláš Zdeněk 17

Bročko Peter 145

Brom Jaroslav 51

Bunda Zbyněk 221

Buršík Martin 163

Bystrianský Jaroslav 81, 89, 93

Bystrianský Martin 221

C

Cvešpr Pavel 177

Č

Čančura Zdeněk 93, 121

Čech Jan 99

Čech Jaroslav 89

Černý Miroslav J. 47

Číhalová Helena 57

Čmakal Josef 115

D

Dopjera Daniel 17

Doubrava Radek 1

Douda Jindřich 115

Ducháček Petr 121

Dvořák Jiří 75

E

Eliášová Ivana 227

Ernestová Miroslava 81, 89, 93

Ertl Jakub 125

F

Fencel Zdeněk 141, 147, 201

Fulín Zdeněk 109, 233

G

Gál Petr 129

H

Hajžman Michal 61

Hakl Jan 99

Halodová Patricie 213

Haušild Petr 81, 89, 93

Holický Milan 151

Horváth Jakub 11, 69, 185, 191

Horváth Ladislav 185

Houdková Šárka 61

Ch

Chocholoušek Michal 51, 171, 233

Chvostová Eva 185

J

Janovec Jiří 11, 69

Jansa Jindřich 217

Junek Lubomír 81, 89, 93

Junek Lukáš 157

Junek Michal 11, 69

K

Kaleta Karel 181

Kander Ladislav 103

Kanta Jiří 217

Kárník Dalibor 57

Kaška Miloš 23

Kaufman Jan 171

Kindelmann Petr 41

Klatovská Petra 227

Kobzová Alena 57, 213

Konopík Pavel 185

Kopřiva Radim 147, 227

Koula Václav 75

Král Petr 75

Krhounek Vladimír 129

Kronďák Martin 213

Krpec Miroslav 201

Kuboň Zdeněk 103

Kučerová Ludmila 221

Kůs Pavel 57, 213

Kvapilová Marie 75

L

Lazar Jan 41

Lukáš Jiří 157

M

Mareček Oto 23

Mareš Pavel 7, 51, 165

Matějček Jan 165

Materna Aleš 227

Mentl Václav 221

Mihóková Janka 213

Mohyla Roman 51

N

Neumannová Šárka 99

O

Omacht Daniel 147

P

Palán Marek 121

Pašek Roman 27

Patera Jan 51, 165

Petzová Jana 147

Pilsová Lucie 69

Pištora Vladislav 129

Plíhal Ondřej 207

Polach Pavel 61

Polcar Petr 41

R

Raška Jan 1

Rohlová Marie 69, 191

Rund Martin 185

Růžička Pavel 99

S

Schuster Milan 35

Siegl Jan 81, 89, 93

Skala Martin 57, 213

Sklenička Václav 75

Slaný Michal 191

Smola Vojtěch	69
Smolík Luboš	27
Soukup Tomáš	195
Strejcius Josef	109, 171
Svobodová Marie	75, 115

Š

Šifner Jan	75
Šik Antonín	201
Šimeček Kamil	41
Šobová Tereza	57
Špirit Zbyněk	109, 171, 233
Šťastný Radovan	157
Švantner Michal	163
Švestka Jiří	23

T

Tesař Jiří	163
Tkáč Štefan	213
Tomek Libor	141
Tonarová Dana	93, 201, 227

V

Valášek Jiří	157
Veselá Jana	7, 51
Veselka Zbyněk	213
Veselý Stanislav	31
Vlasák Tomáš	99
Vlček Petr	135, 207
Vojna Martin	93
Volák Josef	221
Vomáčka Petr	135
Vyvadil Jakub	57

W

Wandrol Jan	129
-------------------	-----

Z

Zahrádka Pavel	165
----------------------	-----

Ž

Žamboch Miroslav	135, 207
Žďárek Jiří	129

Kolektiv autorů

Sborník z 14. konference

„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“

Srní, 24. – 26. září 2019

Západočeská univerzita v Plzni

Vydavatelství

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach a Lukáš Stuna

Počet stran: 287

Vydání první

Náklad: 200 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Petr Zuna, Martin Kronďák, Pavel Polach a Radovan Šťastný

ISBN 978-80-261-0885-6

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2019