

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

**ŽIVOTNOST KOMPONENT
ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ**

Srní
19. – 21. října 2021

Kolektiv autorů

Sborník z 16. konference
„Životnost komponent energetických zařízení“
Srní, 19. – 21. října 2021

ISBN 978-80-261-1045-3
© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2021

ODBORNÍ GARANTI

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

PROGRAMOVÝ VÝBOR

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

ORGANIZAČNÍ VÝBOR

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

GENERÁLNÍ PARTNEŘI



ÚJV Řež, a. s.

HLAVNÍ PARTNEŘI



CVŘ

Centrum
výzkumu Řež



TEPLÁRNA
OTROKOVICE
LAMA energy group



MEDIÁLNÍ PARTNEŘI

all·for **power**

je

ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDAJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK

ÚTERÝ 19. 10. 2021 (ODPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Nové metody softwarové podpory pro zdokonalení provozu energetických zařízení & Problematika primárního okruhu jaderných elektráren
Garant: doc. Dr. Ing. Pavel Polach, FEng.

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

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

STŘEDA 20. 10. 2021 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Materiálové inženýrství & Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů
Garant: Ing. Kamil Prešl

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Servis v energetice & Materiálové inženýrství & Degradace mechanických vlastností konstrukčních materiálů
Garant: doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D.

ČTVRTEK 21. 10. 2021 (DOPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Provoz (klasických tepelných) elektráren & Problematika primárního okruhu jaderných elektráren
Garant: Ing. Radovan Štastný

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

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

PŘEDMLUVA PROFESORA PETRA ZUNY

Vážené kolegyně, vážení kolegové,

Dovolte, abych Vás alespoň tímto způsobem přivítal na tradiční konferenci v Srní. Velmi si vážím všech členů programového výboru i vedení VZÚ Plzeň, kteří napnuli všechny své síly a umožnili přes všechny známé vnější překážky tuto tradiční konferenci uskutečnit.

Děkuji všem účastníkům konference za kvalitní příspěvky, které udržují vysokou laťku této konference. Věřím, že na vysoké úrovni bude i diskuse a spolu s příspěvky potvrdí důležitost nosného tématu konference – zvyšování životnosti a spolehlivosti komponent energetických zařízení. Na energii závisí budoucnost naší společnosti a tato konference další rozvoj v tomto směru jistě podpoří.

Mrzí mně, že se vzhledem ke svým zdravotním problémům s kolenem musím z přímé účasti na konferenci a setkání s Vámi omluvit. Přeji Vám strávení krásných dnů v Srní, získání nových poznatků a vytvoření nových kontaktů. Ať se konference vydaří,

Petr Zuna

PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ

Vážené dámy, vážení pánové,

v první řadě mi dovoluji poděkovat autorům odborných příspěvků i velkému množství pravidelných účastníků konference za neutuchající zájem, energii a čas, který konferenci v Srní věnují. Velmi si toho vážíme.

V minulém roce jsme si prošli zatěžkávací zkouškou, kdy jsme byli nuceni měnit formát konference s dvoutýdenním předstihem. Přes všechna omezení a zřejmá úskalí a diskomfort, které si sebou online formát nesl, jsme oproti očekávání zaznamenali neuvěřitelnou podporu a flexibilitu. Nejen z pohledu účastníků a autorů příspěvků, ale také v podstatě bez výjimky všech sponzorů, kteří nám významně pomohli pokrýt finanční ztráty, které byly s rušením původního formátu spojeny. Díky Vašemu entusiasmus a podpoře jsme s kolegy neváhali a navzdory pochopitelné míře nejistoty jsme obratem potvrdili kolegům ze Srní rezervaci pro ročník 2021. Ani v současné chvíli, kdy finalizujeme sborník pro konferenci, si nedovolím předpovídat, zda se nám opravdu podaří se setkat v Srní osobně, ale za realizační tým věřím, že jsme pro to udělali maximum. Kromě přínosu odborného, který potvrzuje 38 příspěvků přihlášených do programu konference a vysoký počet účastníků, se nám opět podaří obohatit společně strávený čas i o osobní a společenský rozměr, který, jak jsme si v minulém roce a půl velmi dobře ověřili, nelze nahradit ani tím nejrychlejším internetovým připojením ani Retina displejem.

Oproti předchozím ročníkům konference se velké množství příspěvků zabývá problematikou primárního okruhu jaderných elektráren. Úvodní den konference je zaměřen na perspektivní metody softwarové podpory pro zdokonalení provozu energetických zařízení a na problematiku primárního okruhu jaderných elektráren. Středeční program je věnován degradaci mechanických vlastností konstrukčních materiálů, materiálovému inženýrství a servisním službám v energetice. První čtvrtěční blok přednášek je v úvodní části zaměřen na praktická aktuální témata využitelná při provozu klasických tepelných elektráren a pokračuje dalšími příspěvky na téma diagnostika a problematika primárního okruhu jaderných elektráren, která je náplní i závěrečného bloku přednášek konference.

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

Těším se na viděnou.

Stanislav Martínek

PROGRAM 16. ROČNÍKU KONFERENCE ŽIVOTNOST KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Úterý, 19. října 2021

Registrace účastníků v hotelu Srní u recepce, 8.00 – 18.00

Oběd v hotelu Srní, 11.30 – 12.45

Zahájení konference (sál v hotelu Šumava), 13.00

Zahájení konference: S. Martínek (VZÚ Plzeň)
Organizační pokyny: P. Polach

1. odpolední blok přednášek – Pavel Polach (VZÚ Plzeň), 13.15 – 15.15

13.15 – 13.30	Z. Kubín a kol., Lokalizace rázů v technologii s využitím vlnkové transformace
13.30 – 13.45	M. Bělohoubek a kol., Využití neuronového modelu turbogenerátorů jaderné Elektrárny Temelín pro nalezení rozdílu v chování jednotlivých soustrojí
13.45 – 14.00	M. Schuster, Simulace pohybu klastru v tlakovém poli kapaliny
14.00 – 14.15	M. Ruchař a kol., Pohon typu LKP-M/4: nejnovější pohon řídicích tyčí ze ŠKODA JS a.s.
14.15 – 14.30	M. Ruchař, Stend inspekcí palivových souborů
14.30 – 14.45	M. Malá, M. Kopeček a kol., Kontroly jaderného paliva
14.45 – 15.00	J. Klouzal a kol., Aktivity skupiny ČEZ v oblasti bezpečnosti a spolehlivosti jaderného paliva
15.00 – 15.15	J. Žďárek a kol., Hodnocení integrity TNR v případě aplikace strategie IVMR v rámci projektů OECD/NEA a IAEA CRP

Občerstvení, 15.15 – 15.55

2. odpolední blok přednášek – Martin Kronďák (ÚJV Řež, a. s.), 15.55 – 18.00

15.55 – 16.15	S. Štarman, Aplikace přenosných defektoskopů pro diagnostiku v energetice
16.15 – 16.30	J. Běláč a kol., Svědečný program pokrytí jaderného paliva jako druhé bariéry proti úniku štěpných látek do životního prostředí
16.30 – 16.45	M. Malá, M. Zimina a kol., Experimentální podpora svědečného programu pokrytí jaderného paliva
16.45 – 17.00	P. Gávelová a kol., Výzkumný program ALVEL a CVŘ pro komplexní testování a analýzy mikrostruktury pokrytí paliva Zr1Nb
17.00 – 17.15	M. Palán a kol., Výsledky vývoje a přípravy výměny nátrubku odběru měření tlaku na hlavním cirkulačním potrubí JE typu VVER-1000/320
17.15 – 17.30	T. Soukup a M. Vnouček, Experimentální výsledky vývoje technologie opravy nátrubku primárního potrubí
17.30 – 17.45	K. Šišková a kol., Hodnocení tlakově teplotních šoků na nátrubek systému havarijního chlazení aktivní zóny tlakové nádoby reaktoru
17.45 – 18.00	D. Marušáková a kol., Mikrostrukturní analýzy materiálu Inconel 718 po expozici v ultrakritické vodní smyčce a další výzkumné aktivity Centra výzkumu Řež v SCW oblasti

Slavnostní večeře v hotelu Srní, 19.00

Středa, 20. října 2021

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

1. dopolední blok přednášek – Kamil Prešl (ČEZ, a. s.), 8.30 – 10.00

8.30 – 8.45	J. Dvořák a kol., Studie odhadu creepového poškození oceli pro energetická zařízení
8.45 – 9.00	J. Veselá a kol., Detekce creepového poškození svarového spoje ultrazvukem
9.00 – 9.15	V. Sklenička a kol., Aplikace empirických vztahů pro predikci creepového chování a životnosti vysokoteplotních materiálů
9.15 – 9.30	J. Strejcius a kol., Kinetika růstů korozně-únavových trhlin v oceli COR 13/4 pro oběžná kola vodních turbín
9.30 – 9.45	J. Šifner a kol., Možnosti detekce kavitace pomocí akustické emise na vodních strojích s důrazem na úsporu energií a provozní udržitelnost
9.45 – 10.00	P. Vlček a P. Mareš, Využitelnost zkušebních těles typu "drátořez" při validaci softwarů modelujících ultrazvukové zkoušení

Občerstvení, 10.00 – 10.35

2. dopolední blok přednášek – Šárka Houdková (VZÚ Plzeň), 10.35 – 12.15

10.35 – 10.55	T. Klíma a kol., Ecol Lubrication Management v energetice – outsourcing servisu mazání v souladu s ICML 55.1
10.55 – 11.15	J. Lukavský a J. Tomáš, Příčiny selhání utěsnění vyhrazených tlakových zařízení
11.15 – 11.30	Š. Neumannová a kol.: Vliv inovace výrobních technologií na vlastnosti žárupevných ocelí
11.30 – 11.45	N. Ganev a kol., Zbytková napjatost povrchových vrstev oceli opracované metodou Sponge-Jet
11.45 – 12.00	J. Vlasák a Z. Ruml, Vliv erozního poškození na životnost nízkotlakých lopatek s použitím různých erozních ochranných
12.00 – 12.15	P. Polach, O projektu CESEN naposled

Oběd v hotelu Srní, 12.30 – 13.30

Večeře, společenský večer v sále hotelu Srní
(bowlingový turnaj o „Pohár krále hotelů Šumava a Srní“) – od 18.30

Čtvrtek, 21. října 2021

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

1. dopolední blok přednášek – Radovan Šťastný (nezávislý expert), 8.30 – 10.00

8.30 – 8.45	J. Marková a kol., Pilotní aplikace metodik pro optimalizaci diagnostiky a údržby výrobních bloků
8.45 – 9.00	J. Brom a kol., VaV projekty CVŘ pro oblasti nedestruktivních metod a povrchových úprav v roce 2021
9.00 – 9.15	Š. Houdková a kol., Potenciál aplikace technologie nástřiku elektrickým obloukem v energetickém průmyslu
9.15 – 9.30	J. Cizner a kol., Korozní odolnost vybraných nástřiků v prostředí biomasy
9.30 – 9.45	L. Stainer a M. Záviška, Zlepšování procesu zaslepování teplosměnných trubek parogenerátorů jaderných elektráren typu VVER 440 / VVER 1000
9.45 – 10.00	I. Schnablová a kol., Závěrečné výstupy projektu TH02020565 pro stanovení vhodných parametrů pro obnovu mechanických vlastností materiálů vnitřních částí reaktorů typu VVER 440 metodou regeneračního žhání

Občerstvení, 10.00 – 10.30

2. dopolední blok přednášek – Martin Kronďák (ÚJV Řež, a. s.), 10.30 – 11.30

10.30 – 10.45	M. Listík a kol., Posouzení vlivu radiačního bobtnání a tečení na plášť aktivní zóny reaktoru VVER 1000
10.45 – 11.00	M. Krpec a kol., Laboratorní hodnocení stavu potrubí vodíkového chlazení ETE po 20 letech provozu
11.00 – 11.15	P. Fousek, Zvyšování a ověřování odborné způsobilosti svářečů pro svařování vybraných zařízení jaderných elektráren
11.15 – 11.30	M. Jáňa a kol., Automatizované opravné zvarovanie v primárnych okruhoch JE

Oficiální ukončení konference, 11.30 – 11.45

Oběd v hotelu Srní, 12.00 – 13.00

OBSAH

ODBORNÍ GARANTI	III
PROGRAMOVÝ VÝBOR	III
ORGANIZAČNÍ VÝBOR	III
GENERÁLNÍ PARTNEŘI	IV
HLAVNÍ PARTNEŘI	IV
MEDIÁLNÍ PARTNEŘI	V
ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDAJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK	VI
PŘEDMLUVA PROFESORA PETRA ZUNY	VII
PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ	VIII
PROGRAM 16. ROČNÍKU KONFERENCE ŽIVOTNOST KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ	IX
OBSAH	XII
LOKALIZACE RÁZŮ V TECHNOLOGII S VYUŽITÍM VLNKOVÉ TRANSFORMACE	1
LOCALIZATION OF IMPACTS IN MACHINERY WITH THE USE OF WAVELET TRANSFORM	1
ZDENĚK KUBÍN, LUBOŠ SMOLÍK A VÁCLAV HOUDEK	1
VYUŽITÍ NEURONOVÉHO MODELU TURBOGENERÁTORŮ JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN PRO NALEZENÍ ROZDÍLŮ V CHOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SOUSTROJÍ	7
NEURAL MODEL APPROACH TO IDENTIFY ANOMALIES IN TEMELÍN NUCLEAR POWER PLANT TURBINE SETS ..	7
MAREK BĚLOHOUBEK, KAREL LIŠKA, MAREK BOBČÍK, ZDENĚK KUBÍN A PETR POLCAR	7
SIMULACE POHYBU KLASTRU V TLAKOVÉM POLI KAPALINY	13
SIMULATION OF CLUSTER MOTION IN A FLUID PRESSURE FIELD	13
MILAN SCHUSTER	13
POHON TYPU LKP-M/4: NEJNOVĚJŠÍ POHON ŘÍDICÍCH TYČÍ ZE ŠKODA JS A.S.	17
CRDM TYPE LKP-M/4: THE NEWEST CONTROL ROD DRIVE MECHANISM FROM ŠKODA JS A.S.	17
MILOSLAV RUCHAŘ, IGOR MARTINEC A JIŘÍ HUS	17
STEND INSPEKČÍ PALIVOVÝCH SOUBORŮ	21
FUEL ASSEMBLY INSPECTION STAND	21
MILOSLAV RUCHAŘ	21
KONTROLY JADERNÉHO PALIVA	29
NUCLEAR FUEL INSPECTIONS	29
MARTINA MALÁ, MARCIN KOPEĆ, VÍTĚZSLAV MATOCHA A ONDŘEJ PAŠTA	29
AKTIVITY SKUPINY ČEZ V OBLASTI BEZPEČNOSTI A SPOLEHLIVOSTI JADERNÉHO PALIVA	35
ČEZ GROUP ACTIVITIES IN THE FIELD OF NUCLEAR FUEL SAFETY AND RELIABILITY	35
JAN KLOUZAL, VÍTĚZSLAV MATOCHA A MARTIN DOSTÁL	35
HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V PŘÍPADĚ APLIKACE STRATEGIE IVMR V RÁMCI PROJEKTŮ OECD/NEA A IAEA CRP	41
THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT FOR THE IVMR STRATEGY, STATUS OF WORK DURING CONTINUING OECD/NEA AND IAEA/CRP PROJECTS	41
JIŘÍ ŽDÁREK, JAN WANDROL, VLADISLAV PIŠTORA, PETR GÁL, VLADIMÍR KRHOUNEK A DAVID BÁTĚK	41

APLIKACE PŘENOSNÝCH DEFEKTOSKOPŮ PRO DIAGNOSTIKU V ENERGETICE.....	47
STANISLAV ŠTARMAN.....	47
SVĚDEČNÝ PROGRAM POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA JAKO DRUHÉ BARIÉRY PROTI ÚNIKU ŠTĚPNÝCH LÁTEK DO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ	55
SURVEILLANCE PROGRAM OF NUCLEAR FUEL CLADDINGS AS A SECOND BARRIER AGAINST FISSION PRODUCTS RELEASE INTO THE ENVIRONMENT	55
JOSEF BĚLÁČ, STANISLAV LINHART, JANA MATOUŠKOVÁ, RADOMÍR ŘEHÁČEK, VLADISLAV STARÝ A MARTIN ŠEVEČEK	55
EXPERIMENTÁLNÍ PODPORA SVĚDEČNÉHO PROGRAMU POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA.....	61
EXPERIMENTAL SUPPORT TO FUEL CLADDING SURVEILLANCE PROGRAM	61
MARTINA MALÁ, MARIIA ZIMINA, PATRICIE HALODOVÁ, MARTIN ŠEVEČEK, STANISLAV LINHART, JOSEF BĚLÁČ A ONDŘEJ SRBA. 61	
VÝZKUMNÝ PROGRAM ALVEL A CVŘ PRO KOMPLEXNÍ TESTOVÁNÍ A ANALÝZY MIKROSTRUKTURY POKRYTÍ PALIVA ZR1NB	67
ALVEL AND CVR RESEARCH PROGRAM FOR COMPLEX TESTING AND MICROSCOPY EXAMINATION OF ZR1NB FUEL CLADDINGS.....	67
PETRA GÁVELOVÁ, PATRICIE HALODOVÁ, PAVEL ZHÁŇAL, RAJESH JARUGULA, MARIIA ZIMINA, MARTIN ŠEVEČEK A VÍT ROSNECKÝ	67
VÝSLEDKY VÝVOJE A PŘÍPRAVY VÝMĚNY NÁTRUBKU ODBĚRU MĚŘENÍ TLAKU NA HLAVNÍM CIRKULAČNÍM POTRUBÍ JE TYPU VVER-1000/320.....	73
RESULTS OF DEVELOPMENT AND PREPARATION OF THE NOZZLE REPLACEMENT ON THE MAIN CIRCUIT PIPE AT NPP TYPE VVER-1000/320	73
MAREK PALÁN, PETR DUCHÁČEK A ZDENĚK ČANČURA	73
EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY VÝVOJE TECHNOLOGIE OPRAVY NÁTRUBKU PRIMÁRNÍHO POTRUBÍ	77
EXPERIMENTAL RESULTS OF REPAIR DEVELOPMENT OF PRIMARY CIRCUIT NOZZLE	77
TOMÁŠ SOUKUP A MILAN VNOUČEK.....	77
HODNOCENÍ TLAKOVĚ-TEPLOTNÍCH ŠOKŮ NA NÁTRUBEK SYSTÉMU HAVARIJNÍHO CHLAZENÍ AKTIVNÍ ZÓNY TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU	83
VLADISLAV PIŠTORA, MIROSLAV POŠTA A KATARÍNA ŠIŠKOVÁ.....	83
MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZY MATERIÁLU INCONEL 718 PO EXPOZICI V ULTRAKRITICKÉ VODNÍ SMYČCE A DALŠÍ VÝZKUMNÉ AKTIVITY CENTRA VÝZKUMU ŘEŽ V SCW OBLASTI.....	85
MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF MATERIAL INCONEL 718 AFTER THE EXPOSURE IN THE ULTRACRITIC WATER LOOP AND OTHER RESEARCH ACTIVITIES IN THE SCW FIELD IN RESEARCH CENTER ŘEŽ	85
DANIELA MARUŠÁKOVÁ, ROSTISLAV FUKAČ A CLAUDIA APARICIO	85
STUDIE ODHADU CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ OCELI PRO ENERGETICKÁ ZAŘÍZENÍ	93
CREEP DAMAGE ASSESSMENT STUDY OF STEELS FOR ENERGY FACILITIES.....	93
JIŘÍ DVOŘÁK, VÁCLAV SKLENIČKA, PETR KRÁL, MARIE KVAPILOVÁ, MARIE SVOBODOVÁ, JAN ŠIFNER A VÁCLAV KOULA.....	93
DETEKCE CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ SVAROVÉHO SPOJE ULTRAZVUKEM	101
DETECTION OF CREEP DAMAGE OF WELDED JOINT USING ULTRASONICS	101
JANA VESELÁ, PAVEL MAREŠ A ZBYNĚK ŠPIRIT	101
APLIKACE EMPIRICKÝCH VZTAHŮ PRO PREDIKCI CREEPOVÉHO CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOSTI VYSOKOTEPLNÍCH MATERIÁLŮ.....	107
APPLICABILITY OF EMPIRICAL FORMULAS FOR PREDICTION OF CREEP BEHAVIOUR AND LIFETIME OF HIGH-TEMPERATURE MATERIALS	107

VÁCLAV SKLENIČKA, MARIE KVAPILOVÁ, MARIE SVOBODOVÁ, JIŘÍ DVOŘÁK, PETR KRÁL, KVĚTA KUČAŘOVÁ A JOSEF ČMAKAL.	107
KINETIKA RŮSTŮ KOROZNĚ-ÚNAVOVÝCH TRHLIN V OCELI COR 13/4 PRO OBĚŽNÁ KOLA VODNÍCH TURBÍN	113
KINETICS OF CORROSION-FATIGUE CRACKS GROWTH IN COR 13/4 STEEL FOR WATER TURBINE IMPELLERS	113
JOSEF STREJCIUS, ZDENĚK FULÍN, MICHAL CHOCHOLOUŠEK A ZBYNĚK ŠPIRIT	113
MOŽNOSTI DETEKCE KAVITACE POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE NA VODNÍCH STROJÍCH S DŮRAZEM NA ÚSPORU ENERGIÍ A PROVOZNÍ UDRŽITELNOST	119
POSSIBILITIES OF CAVITATION DETECTION USING ACOUSTIC EMISSIONS ON WATER MACHINES WITH AN EMPHASIS ON ENERGY SAVINGS AND OPERATIONAL SUSTAINABILITY	119
JAN ŠIFNER, VÁCLAV KOULA A MARTIN HUDEC	119
VYUŽITELNOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES TYPU „DRÁTOŘEZ“ PŘI VALIDACI SOFTWARE MODELUJÍCÍCH ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ	125
APPLICABILITY OF “WIRE-CAT” TYPE TEST BLOCKS FOR VALIDATION OF ULTRASONIC EVALUATION MODELING SOFTWARE	125
PETR VLČEK A PAVEL MAREŠ	125
ECOL LUBRICATION MANAGEMENT V ENERGETICE – OUTSOURCING SERVISU MAZÁNÍ V SOULADU S ICML 55.1	131
ECOL LUBRICATION MANAGEMENT IN POWER GENERATION – LUBRICATION MANAGEMENT OUTSOURCING IN COMPLIANCE TO ICML 55.1	131
TOMÁŠ KLÍMA, DUŠAN PROSTŘEDNÍ A WOJCIECH MAJKA	131
PŘÍČINY SELHÁNÍ UTĚSNĚNÍ VYHRAZENÝCH TLAKOVÝCH ZAŘÍZENÍ	137
JIŘÍ LUKAVSKÝ A JAN TOMÁŠ	137
VLIV INOVACE VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ NA VLASTNOSTI ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ	143
INFLUENCE OF TECHNOLOGY INNOVATION ON CREEP PROPERTIES OF STEELS	143
ŠÁRKA NEUMANNOVÁ, TOMÁŠ VLASÁK, JAN ČECH A MAREK ŠTÁBL	143
ZBYTKOVÁ NAPJATOST POVRCHOVÝCH VRSTEV OCELI OPRACOVANÉ METODOU SPONGE-JET	147
SURFACE RESIDUAL STRESSES OF SPONGE-JET TREATED STEEL	147
NIKOLAJ GANEV, JIŘÍ ČAPEK, KAREL TROJAN, JIŘÍ ŽDÁREK A KAMIL KOLAŘÍK	147
VLIV EROZNÍHO POŠKOZENÍ NA ŽIVOTNOST NÍZKOTLAKÝCH LOPATEK S POUŽITÍM RŮZNÝCH EROZNÍCH OCHRAN	151
INFLUENCE OF EROSION DAMAGE ON THE LIFE-TIME OF LOW PRESSURE BLADES USING VARIOUS EROSION PROTECTION	151
JAKUB VLASÁK A ZDENĚK RUML	151
O PROJEKTU CESEN NAPOSLED	157
ABOUT THE CESEN PROJECT FOR THE LAST TIME	157
PAVEL POLACH	157
PILOTNÍ APLIKACE METODIK PRO OPTIMALIZACI DIAGNOSTIKY A ÚDRŽBY VÝROBNÍCH BLOKŮ	161
PILOT APPLICATIONS OF METHODOLOGIES FOR OPTIMISATION OF DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF POWER UNITS	161
JANA MARKOVÁ, KLÁRA KOTASSKOVÁ, JAN MLČOCH, KAMIL PREŠL A MIROSLAV SÝKORA	161
VAV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI NEDESTRUKTIVNÍCH METOD A POVRCHOVÝCH ÚPRAV V ROCE 2021	167
R&D PROJECTS OF THE CVŘ FOR NON – DESTRUCTIVE METHODS AND SURFACE TREATMENTS IN 2021	167

JAROSLAV BROM, JANA VESELÁ, JAN PATERA, PETR VLČEK, PAVEL KŮS, JOSEF STREJCIUS A MICHAL CHOCHOLOUŠEK.....	167
POTENCIÁL APLIKACE TECHNOLOGIE NÁSTŘIKU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU .	173
POTENTIAL OF TWIN WIRE ARC SPRAYING TECHNOLOGY FOR APPLICATION IN POWER INDUSTRY	173
ŠÁRKA HOUDKOVÁ, MAREK VOSTŘÁK, ZDENĚK ČESÁNEK, JAN SCHUBERT, SOFIA KŠIŠANOVÁ A JANA NAĐOVÁ	173
KOROZNÍ ODOLNOST VYBRANÝCH NÁSTŘIKŮ V PROSTŘEDÍ BIOMASY	179
CORROSION RESISTANCE OF SELECTED COATINGS IN BIOMASS FLUE GAS	179
JOSEF CIZNER, JAN HRUŠKA A JAKUB MLNAŘÍK	179
ZLEPŠOVÁNÍ PROCESU ZASLEPOVÁNÍ TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK PAROGENERÁTORŮ JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER 440 / VVER 1000	185
IMPROVING THE BLINDING PROCESS OF THE HEAT EXCHANGE TUBES OF PAROGENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANTS TYPE VVER 440 / VVER 1000	185
LUKÁŠ STAINER A MILAN ZÁVIŠKA	185
ZÁVĚREČNÉ VÝSTUPY PROJEKTU TH02020565 PRO STANOVENÍ VHODNÝCH PARAMETRŮ PRO OBNOVU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORŮ TYPU VVER 440 METODOU REGENERAČNÍHO ŽÍHÁNÍ	191
FINAL OUTPUTS OF THE TH02020565 PROJECT FOR DETERMINATION OF SUITABLE PARAMETERS FOR RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF WWER 440 REACTOR INTERNALS MATERIALS BY THERMAL ANNEALING METHOD	191
IVANA SCHNABLOVÁ, RADIM KOPŘIVA, ONDŘEJ BURŠÍK, KATEŘINA RUSŇÁKOVÁ A ALEŠ MATERNA	191
POSOUZENÍ VLIVU RADIČNÍHO BOBTNÁNÍ A TEČENÍ NA PLÁŠŤ AKTIVNÍ ZÓNY REAKTORU VVER 1000.....	199
MATĚJ LISTÍK, VLADISLAV PIŠTORA A MIROSLAV POŠTA	199
LABORATORNÍ HODNOCENÍ STAVU POTRUBÍ VODÍKOVÉHO CHLAZENÍ ETE PO 20 LETECH PROVOZU.....	201
THE EVALUATION OF ETE HYDROGEN COOLING PIPE CONDITION AFTER 20 YEARS OF OPERATION.....	201
MIROSLAV KRPEC, DANA TONAROVÁ, ZBYNĚK VESELKA, ZUZANA VÁVROVCOVÁ A PETR BRABEC	201
ZVYŠOVÁNÍ A OVĚŘOVÁNÍ ODBORNÉ ZPŮSOBILOSTI SVÁŘEČŮ PRO SVAŘOVÁNÍ VYBRANÝCH ZAŘÍZENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN	205
INCREASING AND CERTIFYING THE PROFESSIONAL COMPETENCE OF WELDERS FOR WELDING SELECTED NPP EQUIPMENT	205
PETR FOUSEK	205
REJSTŘÍK AUTORŮ	209

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.

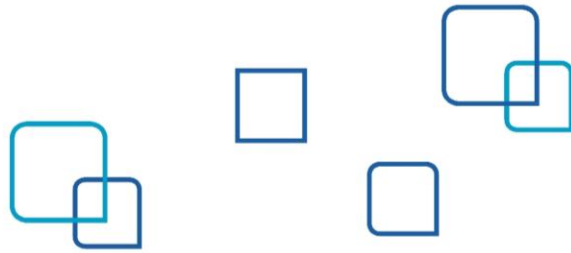
Díky našim zkušenostem a dodávaným technologiím si můžete být jisti, že ČEZ ESCO je investice do budoucna, která přináší chytrá řešení pro vaši společnost.

www.cezesco.cz

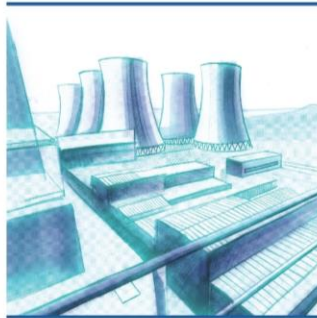


ČEZ ESCO

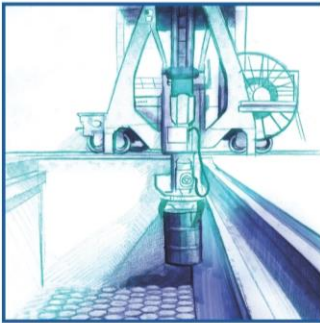
ENERGY
SERVICE
COMPANY



**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





UE UNITED
ENERGY

ST SEVEROČESKÁ
TEPLÁRENSKÁ

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



OLYMPUS

Defektoskop OmniScan® X3



Spolehlivost, kterou můžete zažít

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

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

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

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

Olympus a OmniScan jsou registrovanými známkami společnosti Olympus.

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

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

Více informací na www.olympus-ims.com





CVŘ

Centrum výzkumu Řež

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

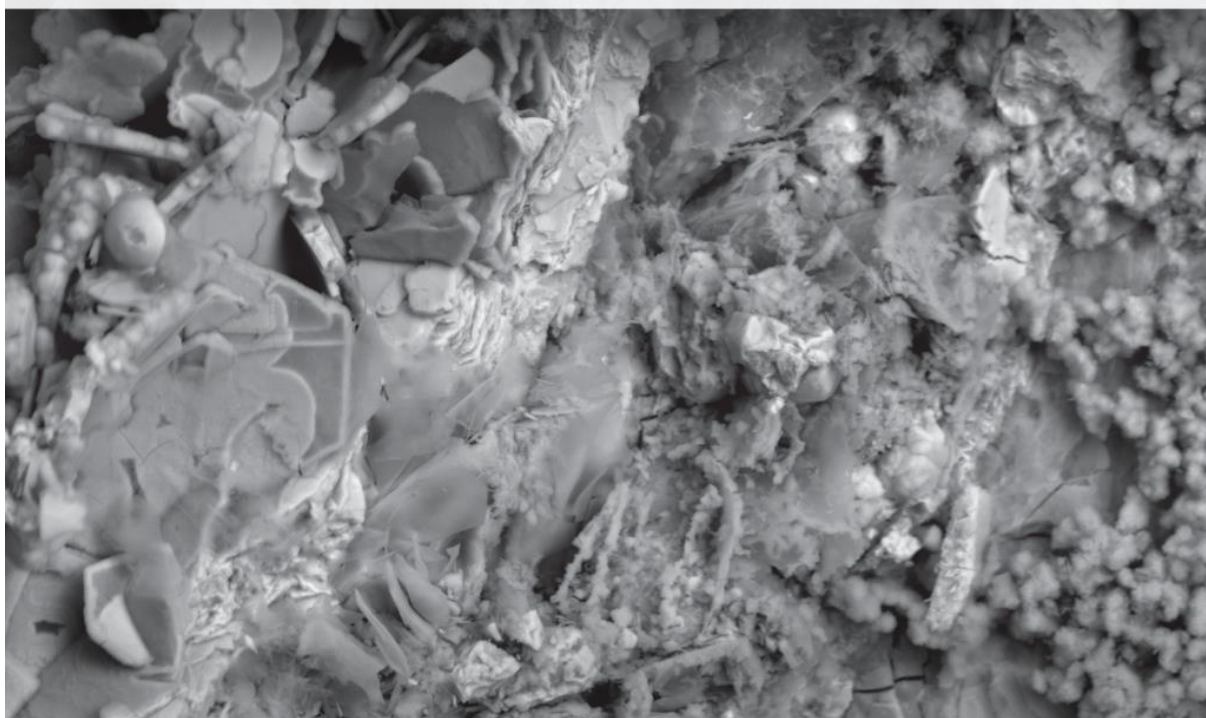
Výzkumná organizace zaměřená na výzkum, vývoj a inovace
v oboru energetiky, zejména jaderné.

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

Podporovatel základního a aplikovaného výzkumu v různých oblastech energetiky.

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

Člen a spoluzakladatel Technologické platformy „Udržitelná energetika ČR“.



www.cvrez.cz cvrez@cvrez.cz +420 266 173 181

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

DIO 3000, DIO 3000 LP (mini)

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

Telemetrické stanice v energetice

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



Digitální přenosné ultrazvukové defektoskopy

Defectobook® DIO1000 PA nyní umožňuje zobrazování v režimu Phased Array

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

HLAVNÍ OBORY POUŽITÍ:

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

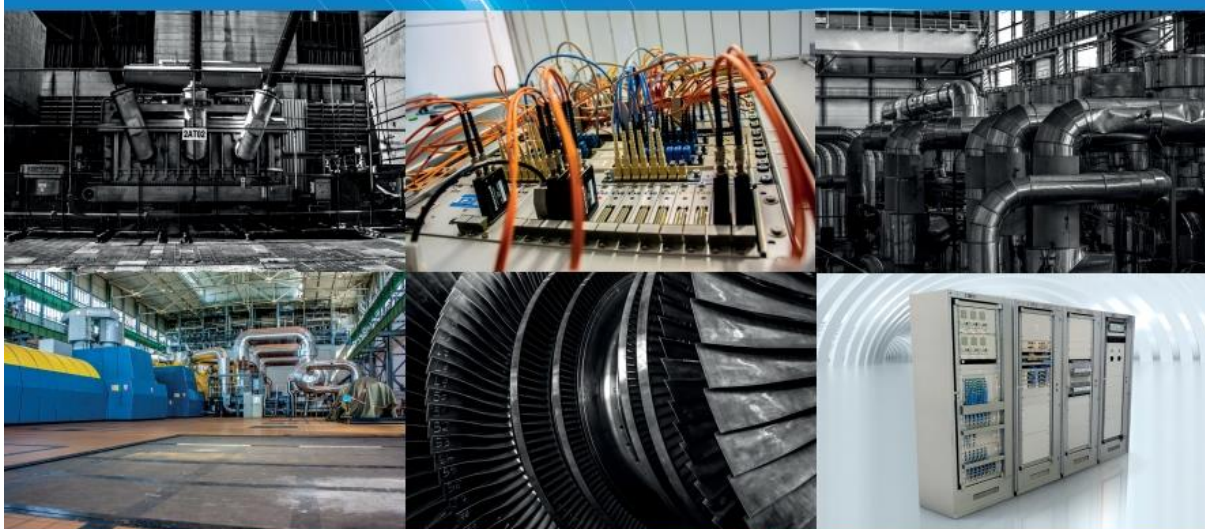




www.tes.eu

Inženýrské služby v jaderné energetice

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



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

www.ecolindustrial.cz



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

Olejevého hospodářství, outsourcingu mazacích služeb, tribodiagnostiky a průmyslového čištění

Hydrodynamické čištění

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

Servis olejových a hydraulických systémů

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

Chemické čištění, konzervace

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

Ecol Fluid Management – outsourcing mazání

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

Tribodiagnostika a poradenství

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

ICML 55.1 ready – implementace Lubrication Managementu



Ecol certifikáty a ocenění:



Ecol Industrial s.r.o. tel.: +420 317 842 227 GSM: +420 774 663 320 www.ecolindustrial.cz



UnionOcel

Váš ocelový partner



Otěruvzdorné plechy

Plechý, výpalky
a komponenty
300–600 HB

**DUROSTAT
DILLIDUR
XAR**

**CREUSABRO
BRINAR 400Cr
QUARD
X120 Mn 12**

**toughcore®
DUROSTAT 400/450**

Speciální
návarové materiály
**650–1000 HV
CORODUR**

Vše z našeho
skladového
a servisního centra
v Koprivnici



www.unionocel.com



Člen federace evropských materiálových společností – FEMS

<http://www.csnmt.cz>

Zaměření činnosti a cíle společnosti

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

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

Odborné tematické oblasti

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

Organizační uspořádání společnosti

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

Hlavní trvalé aktivity

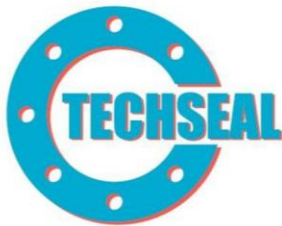
- Vydávání publikace „Průvodce systémem státní podpory výzkumu a vývoje v České republice“
- Vydávání příruček
- Vydávání elektronické publikace „Zpravodaj ČSNMT“
- Spolupořádání mezinárodních konferencí „METAL“, „NANOCON“, konferencí o struktuře materiálů a mikromechanice lomu (MSMF), „COMAT“ a česko-slovenských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

Mezinárodní spolupráce

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

Sídlo ČSNMT

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



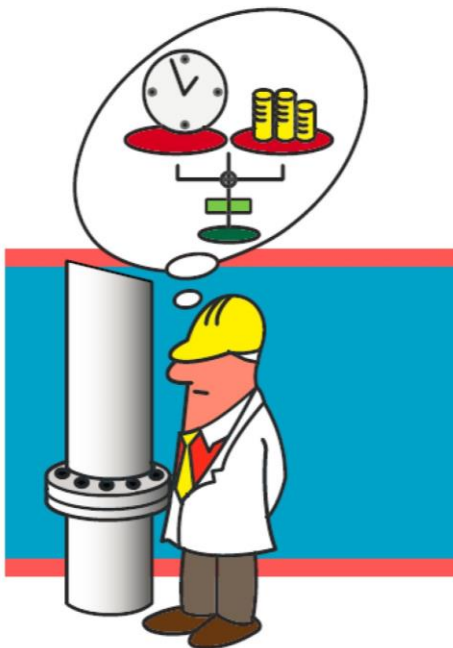
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

KONZULTACE & ODBORNÉ POSUDKY

VÝPOČTY, ZKOUŠKY, KVALIFIKACE & ŠKOLENÍ

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

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



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

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

Více na www.techseal.cz/skoleni 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.

Černokostecká 128/161

102 00 PRAHA 10

technici@techseal.cz

tel.: +420 602 337 058

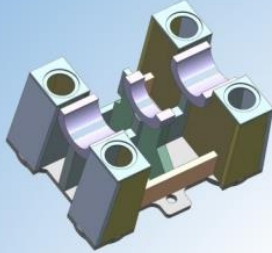


FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

REGIONÁLNÍ
TECHNOLOGICKÝ
INSTITUT

REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT

VÁŠ PARTNER PRO VĚDU, VÝZKUM A SPOLUPRÁCI



Digitální inženýring

Silniční vozidla

Aditivní výroba

Kolejová vozidla

Materiálové inženýrství

Strojírenství

Laboratoř pro virtuální prototyping

Laboratoř kovové aditivní výroby

Metalografická laboratoř

Laboratoř experimentálního tváření

Mechanická zkušebna

Zkušebna provozní pevnosti a únavové životnosti

Laboratoř strojírenských experimentálních metod

Laboratoř technologie obrábění

Laboratoř dílenské metrologie



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

T : +420 377 638 701

E : rti@rti.zcu.cz

www.rti.zcu.cz





Inženýrská akademie České republiky

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

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

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

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

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

Kontakt

Inženýrská akademie České republiky, z.s.

Národní 3

110 00 Praha 1

e-mail: eacr@eacr.cz

web: www.eacr.cz

LOKALIZACE RÁZŮ V TECHNOLOGII S VYUŽITÍM VLNKOVÉ TRANSFORMACE

LOCALIZATION OF IMPACTS IN MACHINERY WITH THE USE OF WAVELET TRANSFORM

Zdeněk Kubín, Luboš Smolík a Václav Houdek

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 01 Plzeň

Abstrakt

Článek popisuje experimentální metodu, pomocí které lze lokalizovat rázy v obecné konstrukci. Měření vibrací v několika měřících bodech umožňuje stanovit čas, kdy rázová vlna dorazí od místa buzení ke snímači. Rychlosti rázových vln směřujících k jednotlivým snímačům se zdánlivě liší, protože obecná geometrie konstrukce ovlivňuje cestu rázové vlny mezi bodem rázu a měřícím bodem. Ráz tedy není možné přesně lokalizovat pouhou triangulací a úloha se řeší pomocí optimalizace. Přesnost optimalizace závisí na počátečních podmínkách a optimalizačních parametrech, proto je také studován a analyzován jejich vliv.

Abstract

This paper describes an experimental method that can be used to find the location of an impact point in a general three-dimensional structure. Measuring vibrations at several measurement points allows determining when the shock wave arrives from the excitation/impact point to the sensor. The velocities of the shock waves travelling to the sensors are seemingly different because the general geometry of the structure affects the path of the shock wave between the impact point and each sensor. For this reason, the impact point cannot be accurately localized by triangulation methods, and the problem is solved by constrained optimization. The accuracy of this method depends on initial conditions and optimization parameters, so their influence is also studied and analyzed.

Úvod

Tento článek byl motivován smluvním výzkumem, který probíhal v létě 2020 a spočíval v lokalizaci rázů v převodovce. Na základě tohoto výzkumu vyvinuli řešitelé oblasti výzkumu metodu, pomocí které lze lokalizovat vibrační anomálie, jako jsou například rázy, na základě měření vibrační odezvy zařízení nebo konstrukce s vysokou vzorkovací frekvencí (více než 100 kHz). Naměřená odezva je zpracována pomocí vlnkové transformace a je vyhodnocen čas, ve kterém dorazí vlna způsobená vibrační anomálií ke snímači vibrací. Protože není známá cesta, po které vlna ke snímači dorazila, není možné polohu anomálie určit pouhou triangulací a je nutné sestavit přeuročenou soustavu rovnic a lokalizovat anomálii pomocí optimalizace. Kvůli tomu nejsou výsledky zcela jednoznačné a je nutné lokalizaci provést několikrát s různými počátečními podmínkami a optimalizačními parametry.

Motivace

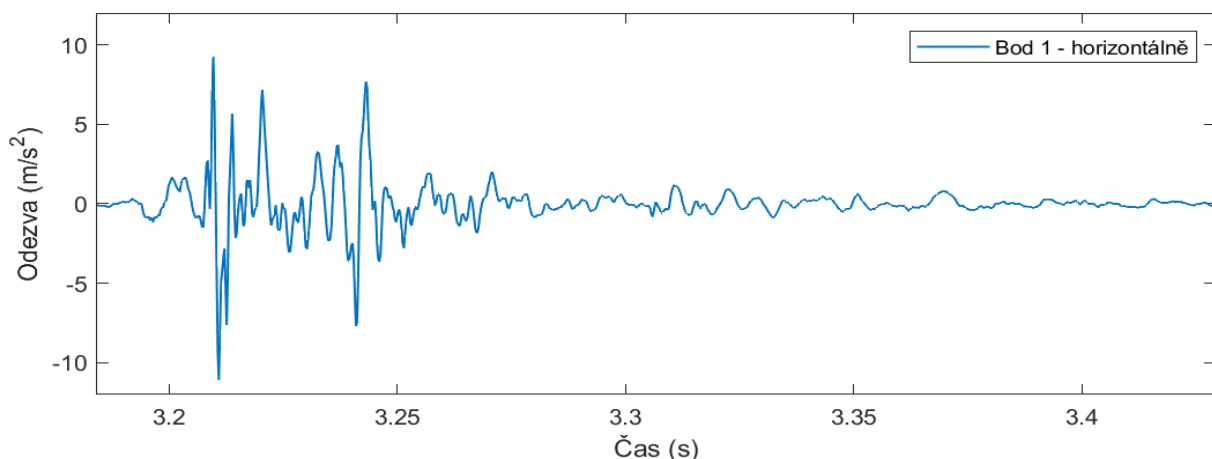
Rutinní diagnostické měření převodovky se dvěma vstupními a dvěma výstupními hřídeli (obr. 1) odhalilo, že v zařízení vznikají rázy s periodou jednou za otáčku výstupních hřídelů. Provozovatel převodovky předpokládal, že tyto rázy mohou vznikat v jednom z kardanových hřídelů připojených na výstupní hřídele. Z toho důvodu byla následná diagnostika provedena nejen pomocí přenosného analyzátoru vibrací a kontaktních snímačů zrychlení, ale také s využitím vysokorychlostní kamery. Záznam z vysokorychlostní kamery je možné použít pro analýzu výchylek na stacionárních i rotujících součástech zařízení [1].



Obr. 1: Pohled na převodovku se dvěma motory a dvěma výstupními hřídeli

Právě s využitím vysokorychlostní kamery se autoři v prvním kole pokusili rázy lokalizovat. Nicméně během měření bylo zjištěno, že rázy nevznikají v kloubech kardanových hřídelů ani ve válčovacím zařízení, které bylo převodovkou poháněné. Příčinu tedy bylo nutné hledat uvnitř převodovky. Vzhledem ke konstrukčnímu provedení převodovky, které zahrnuje několik zubových vazeb s totožným převodovým poměrem, nebylo možné určit poruchu standardními metodami technické diagnostiky. Standardní technická diagnostika identifikuje poruchu při znalosti tzv. poruchových frekvencí, které jsou u zmíněných zubových vazeb totožné.

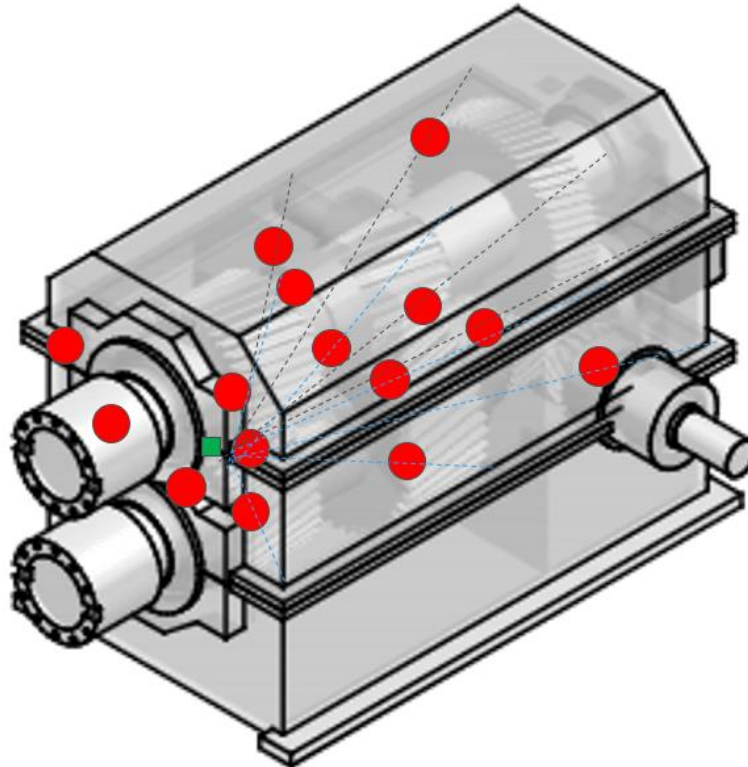
Proto bylo následně přistoupeno k měření vibrací na skříni převodovky s analyzátozem vibrací Brüel & Kjaer 3050-A060 a čtyřmi tříosými snímači zrychlení Brüel & Kjaer 4529 B (nom. citlivost 100 mV/g). Měření odezvy bylo provedeno s vysokou vzorkovací frekvencí (140 kHz), aby se podařilo přesně určit čas příchodu rázové vlny do jednotlivých měřicích bodů. Odezva byla měřena celkem v 17 různých měřicích bodech a 1 referenčním bodě. Typický záznam odezvy je ukázán na obr. 2. Ze záznamů odezvy se autoři pokusili lokalizovat rázové buzení pomocí standardní triangulační metody.



Obr. 2: Časový průběh signálu s rázovou vlnou; čas příchodu vlny je cca 3,2 s

Jelikož všech 18 měřicích bodů nebylo možné změřit během jedné realizace, musel být triangulační algoritmus upraven s využitím referenčního (nehybného) snímače. Kvůli nehomogenní geometrii nelze předpokládat, že se rázová vlna šíří do všech směrů stejnou rychlostí, a proto

tento prvotní algoritmus zahrnoval pouze poměr příchodu mezi referencí a odezvou. Výsledek takto použité triangulační metody nebyl zcela uspokojivý, jak ukazuje obr. 3. Tento ne příliš sofistikovaný přístup byl později rozšířen s využitím dvou moderních metod. Zaprvé, časový signál byl podroben vlnkové transformaci. Zadruhé, lokalizace rázu pomocí podílu bylo nahrazeno soustavou rovnic a optimalizačním výpočtem.

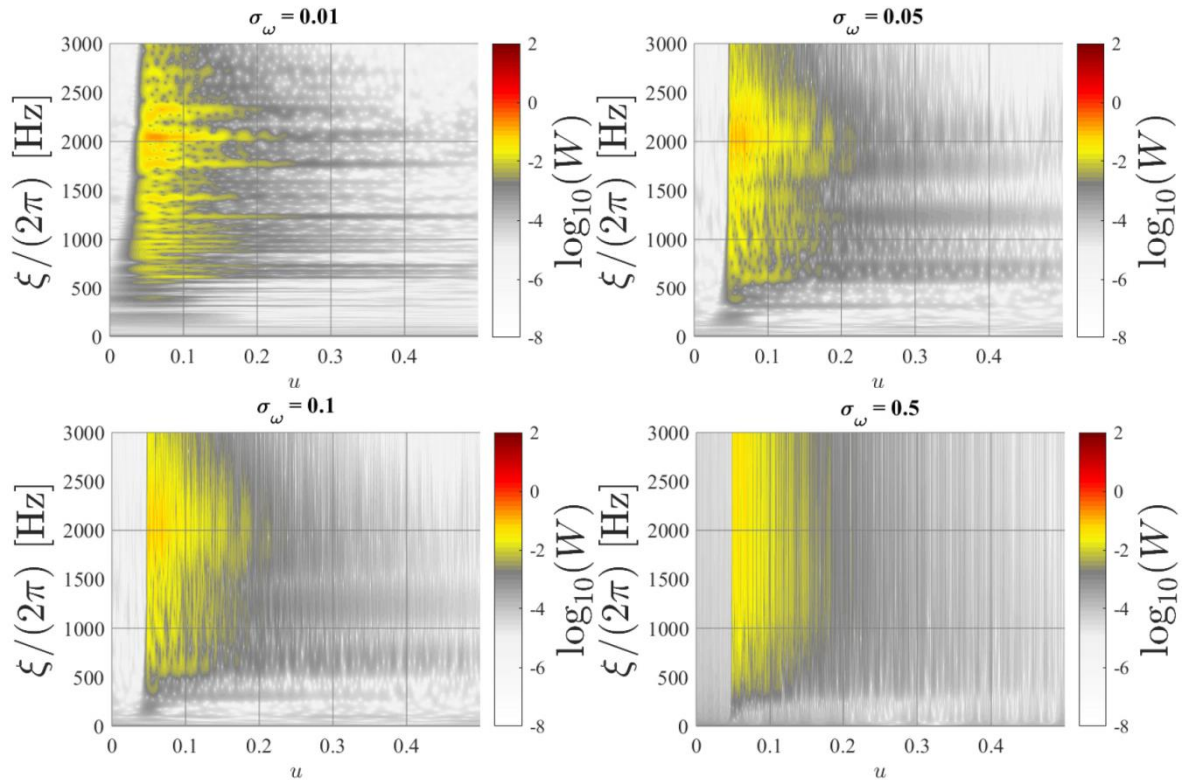


Obr. 3: Odhad místa rázového buzení z rozdílů časový průběhů mezi referencí a měřeným místem s využitím standardní triangulační metody; červená kolečka ilustrují poměr mezi referencí a odezvou na přímé spojnici těchto bodů

Detekce příchodu rázové vlny vlnkovou transformací

Vlnková transformace (*wavelet transform*, WT) je podobně jako krátkodobá Fourierova transformace (STFT), Hilbertova-Huangova transformace nebo Wignerovo-Villeovo rozdělení, vhodná pro časově-frekvenční analýzu nestacionárních dat. Na rozdíl od Fourierovy transformace však WT nepoužívá k rozkladu signálu ortogonální bázi trigonometrických funkcí, ale takzvané vlnky. Vlnkové funkce se volí na základě dané úlohy [2]. Výsledkem není jako v případě STFT spektrogram, ale škálogram (angl. *scalogram*).

V případě lokalizace rázu byly dobré výsledky dosaženy při použití tzv. Gaborovy nebo také Morletovy vlnky. Nespornou výhodou této vlnky je její snadná převoditelnost do frekvenční oblasti a poměrně snadné nastavení volných parametrů. Nejdůležitějším parametrem je dilatace vlnky, angl. též *frequency spread* σ_{ω} [2, 3]. Hodnota dilatace vlnky σ_{ω} značně ovlivňuje výsledky, viz obr. 4.



Obr. 4: Škálogram s využitím vlnkové transformace pro různá nastavení dilatace vlnky σ_ω

Na základě výpočtu WT pro několik signálů a hodnot σ_ω bylo ověřeno, že pro určení času příchodu rázové vlny je vhodné volit σ_ω v rozmezí $0.5 < \sigma_\omega < 2$.

Čas, kdy rázová vlna dorazí do měřeného místa je určen jako čas, kdy ve škálogramu dojde k významné změně. Jak ukazuje obr. 4, k nejvýznamnějším změnám dochází ve frekvenčním pásmu od 2000 do 3000 Hz. Čas příchodu rázové vlny v konkrétním signálu je pak určen jako průměr časů příchodu na každé frekvenční čáře v tomto frekvenčním pásmu. Časové řady na jednotlivých frekvenčních čarách jsou zpracovány metodou popsanou v [4, 5].

Princip lokalizace rázu

Jak již bylo řečeno, u obecného zařízení není známá cesta, po které rázová vlna dorazila ke konkrétnímu snímači. Z toho důvodu není známá zdánlivá rychlost vlny v jednotlivých měřicích bodech a polohu rázu nelze určit triangulací. Princip zde představené metody nicméně z triangulace vychází

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{M}_n\| - v_n \|\mathbf{T}_n\| = 0 := S_n, \quad (1)$$

kde $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ jsou neznámé souřadnice polohy rázu, \mathbf{M}_n je vektor polohy n -tého snímače vibrací, \mathbf{T}_n je vektor času, kdy dorazila vlna ke snímači v jednotlivých směrech kartézského systému a v_n zdánlivá rychlost vlny. Zdánlivá rychlost vlny v_n zahrnuje několik faktorů, které ovlivňují čas, za jaký se vlny dostávají ke snímačům. Hlavním faktorem je celková délka cesty, kterou vlna putuje ke snímači. Tento faktor je dán především konstrukčním řešením měřeného objektu. Dalším neméně důležitým faktorem je přechod materiálovým rozhraním, neboť v různých materiálech se rázové vlny šíří různou rychlostí. Skořepinami se navíc může šířit několik vln o různých rychlostech – nejznámějšími jsou podélné a příčné vlny [7].

Celkem je k měření použito N snímačů, a proto lze z rovnice (1) sestavit soustavu

$$\mathbf{s} = \begin{cases} S_1, \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_N, \end{cases} \quad (2)$$

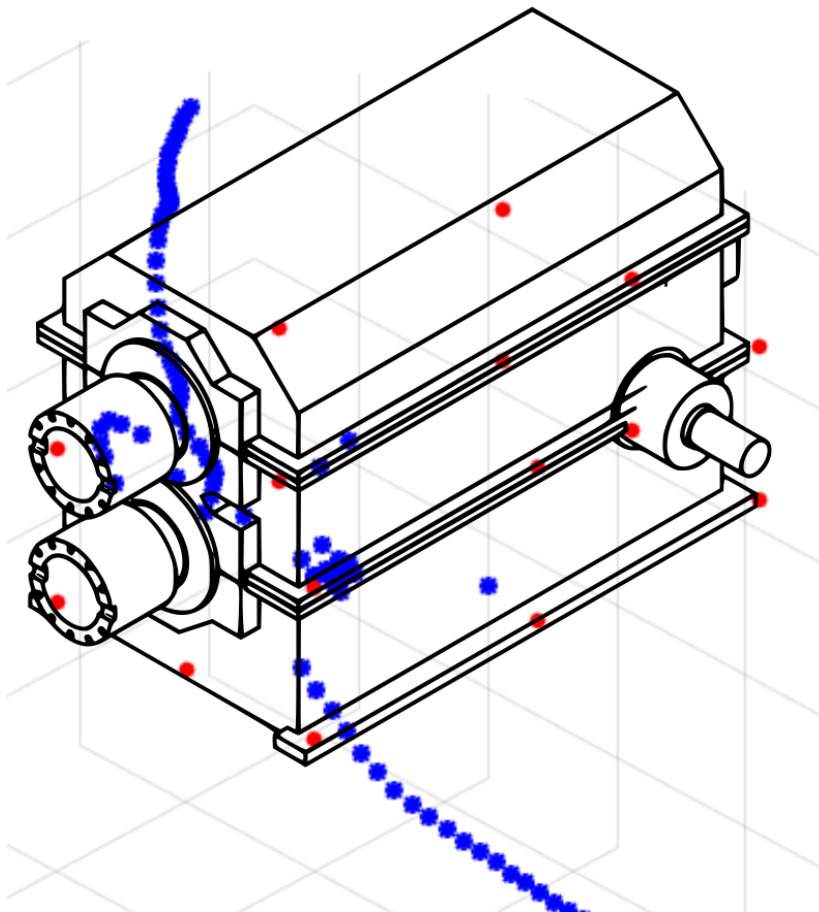
která je pro potřeby optimalizace transformována do tvaru

$$\sqrt{S_1 + S_2 + \dots + S_N} = 0. \quad (3)$$

Vhodné počáteční podmínky lokalizaci rázu jsou získány triangulační metodou, kdy jsou zdánlivé rychlosti v jednotlivých bodech nahrazeny konstantní rychlostí, která je může být stanovena náhodně nebo jako rychlost podélné vlny v oceli. Vektor neznámých souřadnic $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ je pro potřeby optimalizace omezen tak, aby ráz nemohl být lokalizován na nesmyslném místě.

Aplikace metody

Na obr. 5 jsou ukázány výsledky navržené metody. Je patrné, že řešení optimalizačního problému pro určitý interval počátečních podmínek konverguje do stejného místa převodovky (shluk modrých bodů v blízkosti výstupních hřídelů). Toto místo skutečně odpovídá zubové vazbě mezi výstupními hřídeli.



Obr. 5: Červené tečky znázorňují umístění akcelerometrů, modré tečky výsledky lokalizace rázového buzení; různé výsledky jsou dány různými počátečními podmínkami optimalizace

Závěr

V článku byla představena metoda pro lokalizaci rázového buzení. Tato metoda zahrnuje naměření odezvy na buzení pomocí snímačů zrychlení a analyzátoru schopného zaznamenat vibrační signál se vzorkovací frekvencí vyšší než 100 kHz. Naměřená odezva je dále podrobena vlnkové transformaci pomocí Gaborovy vlnky. Ze získaných škálogramů jsou určeny časy, kdy rázová vlna dorazí ke snímači. Tyto časy jsou společně s vhodně zvolenými počátečními podmínkami použity v optimalizačním procesu, který hledá neznámou polohu rázového buzení a zdánlivé rychlosti vlnění v jednotlivých bodech. Výstupem optimalizačního procesu je poloha rázového buzení v technologii pro danou sadu počátečních podmínek. Vzhledem k tomu, že není zajištěna existence globálního optima, je nutné optimalizaci provést pro různé sady počátečních podmínek. Poloha rázového buzení pak odpovídá limitnímu bodu, ke kterému se přibližují výsledky jednotlivých optimalizací.

Výše popsaná metoda byla úspěšně nasazena při hledání neznámého rázu ve velké převodovce, kde bez nutnosti demontáže technologie odhalila, které ozubení způsobuje rázové buzení. Tuto metodu lze využít i v jiných aplikacích, kde dochází k pravidelným či nepravidelným rázům, dotekům či jiným poruchám vyvolávajícím rázy, které je potřeba přesně lokalizovat.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace poskytnuté Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] Smolík, L., Pašek, R. (2020): Využití vysokorychlostní kamery v diagnostice strojů. *DIAGO 2020, Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení*, VŠB – TU Ostrava, Sněžné – Milovy, str. 132-139, 2020. ISBN 978-80-248-4380-3
- [2] Carassale, L., Marrè-Brunenghi, M., Patrone, S. (2018): *Wavelet-based identification of rotor blades in passage-through-resonance tests*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 98, pp. 124-138. ISSN 0888-3270
- [3] Carassale, L., Marrè-Brunenghi, M., Patrone, S. (2015): Estimation of damping for turbine blades in non-stationary working conditions. *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, ASME, Montreal (Quebec, Canada), paper GT2015-42945. ISBN 978-0-7918-5677-2
- [4] Jackson, B., Scargle, J. D., Barnes, D., Arabhi, S., Alt, A., Gioumoussis, P., Gwin, E., Sangtrakulcharoen, P., Tan, L., Tsai, T. T. (2005): *An algorithm for optimal partitioning of data on an interval*. IEEE Signal Processing Letters, Vol. 12, pp. 105-108. ISSN 1070-9908
- [5] Killick, R., Fearnhead, P., Eckley, I. A. (2012): *Optimal detection of changepoints with a linear computational cost*, Journal of the American Statistical Association, Vol. 107(500), pp. 1590-1598. ISSN 0162-1459
- [6] Houdek, V., Kubín, Z., Smolík, L. (2021): Impact point localization with the use of wavelet transform. *Dynamical Systems – Theory and Applications*, Łódź University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Automation, Biomechanics and Mechatronics, Łódź (Poland). (in print)
- [7] Mračko, M., Adámek, V., Berezovski, A., Kober, J., Kolman, R. (2021): *Experimental, analytical, and numerical study of transient elastic waves from a localized source in an aluminium strip*. Applied Acoustics, Vol. 178, paper 107983. ISSN 0003-682X

VYUŽITÍ NEURONOVÉHO MODELU TURBOGENERÁTORŮ JADERNÉ ELEKTRÁRNY TEMELÍN PRO NALEZENÍ ROZDÍLŮ V CHOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SOUSTROJÍ

NEURAL MODEL APPROACH TO IDENTIFY ANOMALIES IN TEMELÍN NUCLEAR POWER PLANT TURBINE SETS

Marek Bělohoubek, Karel Liška, Marek Bobčík, Zdeněk Kubín a Petr Polcar

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, s.r.o., Tylova 1581/46, 301 01 Plzeň

Abstrakt

Príspevek popisuje využití umělé inteligence a strojového učení pro vytvoření a trénink neuronového modelu turbosoustrojí jaderné Elektrárny Temelín na základě dostupných diagnostických dat za účelem detekce odlišností v chování turbín TG1 a TG2. Následně jsou uvedeny výsledky neuronového modelování a na nich demonstrovány možnosti využití umělé inteligence v energetických aplikacích, doporučení pro praxi a upozornění na související úskalí.

Abstract

The paper describes the use of artificial intelligence and machine learning to build and train a neural model of the turbine sets of the Temelín nuclear power plant based on available diagnostic data in order to detect anomalies and differences in the behavior of TG1 and TG2 turbines. Subsequently, the results of neural modeling are presented and they demonstrate the possibilities of using artificial intelligence in power engineering applications and recommendations for practice.

Neuronové modelování

Neuronové modelování (umělá inteligence, strojové učení, datová věda) se díky dostupnosti výkonného výpočetního hardware v současnosti dynamicky rozvíjí a nalézá uplatnění v široké nejen technické praxi. Období nazývané jako „Winter AI“ je dávno pryč [1]. Vzhledem k tomu, že aplikací v energetice je v České republice doposud nemnoho, v úvodní stati čtenáři přiblížíme (s určitým technickým zjednodušením) tento moderní přístup k modelování srovnáním s modelováním fyzikálním.

Princip fyzikálního modelování je dobře známý – řešitel identifikuje technický problém, s využitím znalosti fyzikálních principů jej popíše odpovídajícími vztahy (rovnicemi) a následně využije matematický aparát, aby našel odpovídající řešení těchto rovnic. Výpočetní výkon hardware je zde využit pro řešení získaných rovnic popisujících tento fyzikální model (často s využitím některé z numerických metod – např. metody konečných prvků). Můžeme zjednodušit, že známe vstupy, známe fyziku, formulujeme rovnice a hledáme výsledek.

Princip *neuronového modelování* je odlišný. Vychází ze znalosti velkého množství vstupů a odpovídajících výstupů (řešení). Výpočetní výkon hardware je následně využit k tomu, aby hledal vztah, který odpovídá všem dostupným sadám vstupů a výstupů. Tento proces hledání odpovídajícího modelu se nazývá *strojové učení*. Získaný model lze použít k řešení souvisejících úloh, modely získané tímto způsobem se někdy nazývají *digitální dvojčata* (digitální dvojče nějakého zařízení je ale obecně možné vytvořit i na základě fyzikálního modelu, případně kombinací obou přístupů). Pokud opět shrneme, lze říct, že známe vstupy, známe výsledek a hledáme rovnice (pozorný čtenář si porovnáním souhrnů přístupů všimne, že zdánlivě nemůžeme znát fyziku).

Využití datové vědy pro tvorbu modelů, které mohou následně predikovat chování nějakého zařízení je tedy vhodné tam, kde známe dostatečné množství kombinací podmínek provozu a výsledného chování. Klíčová energetická zařízení jsou obvykle vybavena pokročilou diagnostikou, která sbírá provozní data (z pohledu modelu jak vstupní, tak výstupní), a to dlouhodobě.

Potenciál využití datové vědy k tvorbě digitálních dvojčat klíčových zařízení a následné predikce jejich chování (abnormality, poruchy, životnost, optimalizace chodu, ...) je tedy značný.

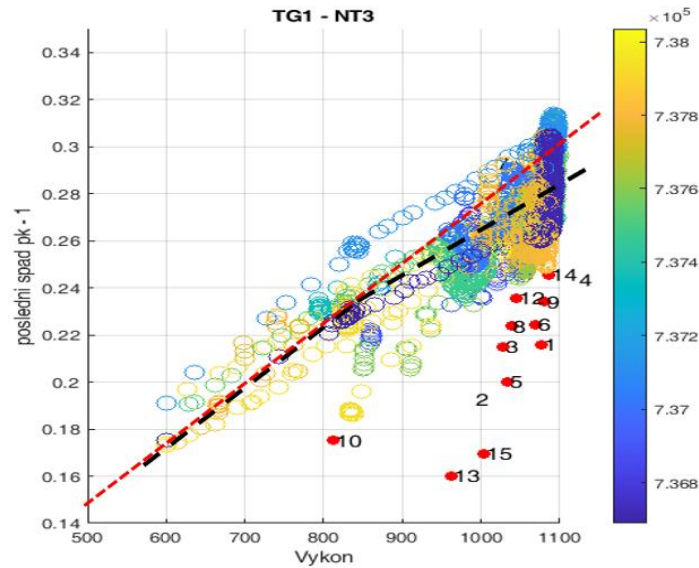
Datová věda a metody strojového učení jsou v současnosti vyučovány na řadě vysokých škol. Určitým rizikem pro vhodné nasazení datové vědy na energetických zařízeních je skutečnost, že řada datových vědců jsou profesí IT specialisté, finanční matematici apod. Přestože pro nasazení strojového učení do technické praxe není třeba znát fyzikální podstatu řešené problematiky, je vhodné, aby byly do řešitelských týmů začleňováni i odborníci na danou technickou oblast minimálně v roli odborné supervize. Kvalita vytvořených neuronových modelů je totiž silně podmíněna jak vhodnou volbou množiny vstupních parametrů, tak jejich odpovídající úpravou (filtrace dat, korekce chyb měřících přístrojů, ...). A právě tyto postupy, společně s fyzikální interpretací výsledků, již vyžadují technicky odbornou znalost zkoumaného fenoménu.

Motivace pro využití datové vědy na jaderné Elektrárně Temelín

Na temelínském turbosoustrojí 1100 MW byly na nízkotlakých dílech dlouhodobě (od r. 2017) pozorovány teplotní a tlakové anomálie. Jaderná elektrárna (JE) využívá dvojici stejných parních turbín vybavených celkem šesti konstrukčně shodnými nízkotlakými (NT) díly, přesto turbína TG1 dlouhodobě dodávala nižší výkon. Turbosoustrojí je vybaveno pokročilou diagnostikou a dlouhodobě je sbíráno velké množství dat ukládané do Centrálního úložiště technických dat (CÚTD). Vzhledem k existenci podmínek nutných pro aplikaci neuronového modelu (dostupnost velkého množství vstupních a výstupních dat) bylo rozhodnuto o nasazení datové vědy s cílem porovnat chování jednotlivých soustrojí a identifikovat veličiny s negativním vlivem na chod stroje pro následnou optimalizaci. Zároveň, pro korektní sestavení a trénink neuronového modelu, byly k dispozici HBD (*Heat Balance Diagram*, teplotní bilance) soustrojí a též úzký kontakt s expertním Týmem Turbína na JE Temelín. Řešitelský tým ze společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. byl sestaven z pracovníků s dlouhodobými zkušenostmi s problematikou parních turbín.

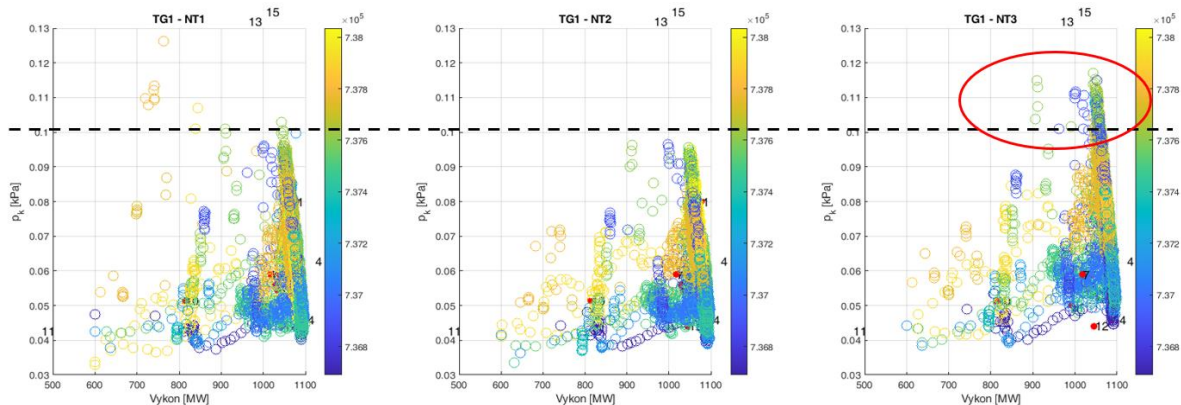
Analýza stavu turbogenerátoru

V prvním kroku bylo nutné provést analýzu chování obou bloků. K tomu byla natrénována první jednoduchá neuronová síť se sedmi vstupy odpovídajícími výkonu turbogenerátoru, vstupním tlakům páry na NT dílech a jedním výstupem, kterým bylo číslo HBD. Tento jednoduchý model nám dovolil rychle a efektivně porovnat oba bloky z pohledu fázování (zvyšování výkonu na intervalu 0 až 1100 MW). Mimo jiné bylo zjištěno odlišné chování TG1 NT3 během tohoto fázování. Jak ukazuje obr. 1, při 800 MW docházelo k odklonu průběhu výkonu a tlakového spádu na posledním stupni od lineárního trendu.



Obr. 1: Výstup: Tlak a výkon TG1 NT3 (barva reprezentuje čas pod dobu 3 let)

Na obdobných grafech (obr. 2) bylo dále ukázáno, že toto chování je typické zejména pro TG1 NT3, méně pak pro ostatní NT díly na TG1 a vůbec pro TG2. Již tato jednoduchá studie potvrdila předpoklady provozovatele o abnormálním chování stroje TG1.



Obr. 2: Tlak v kondenzátorech TG1 (barva reprezentuje čas pod dobu 3 let)

Výsledkem této úvodní studie bylo vytipování 66 parametrů, které byly použity jako vstupy do hlavního neuronového modelu.

Neuronový model turbosoustrojí

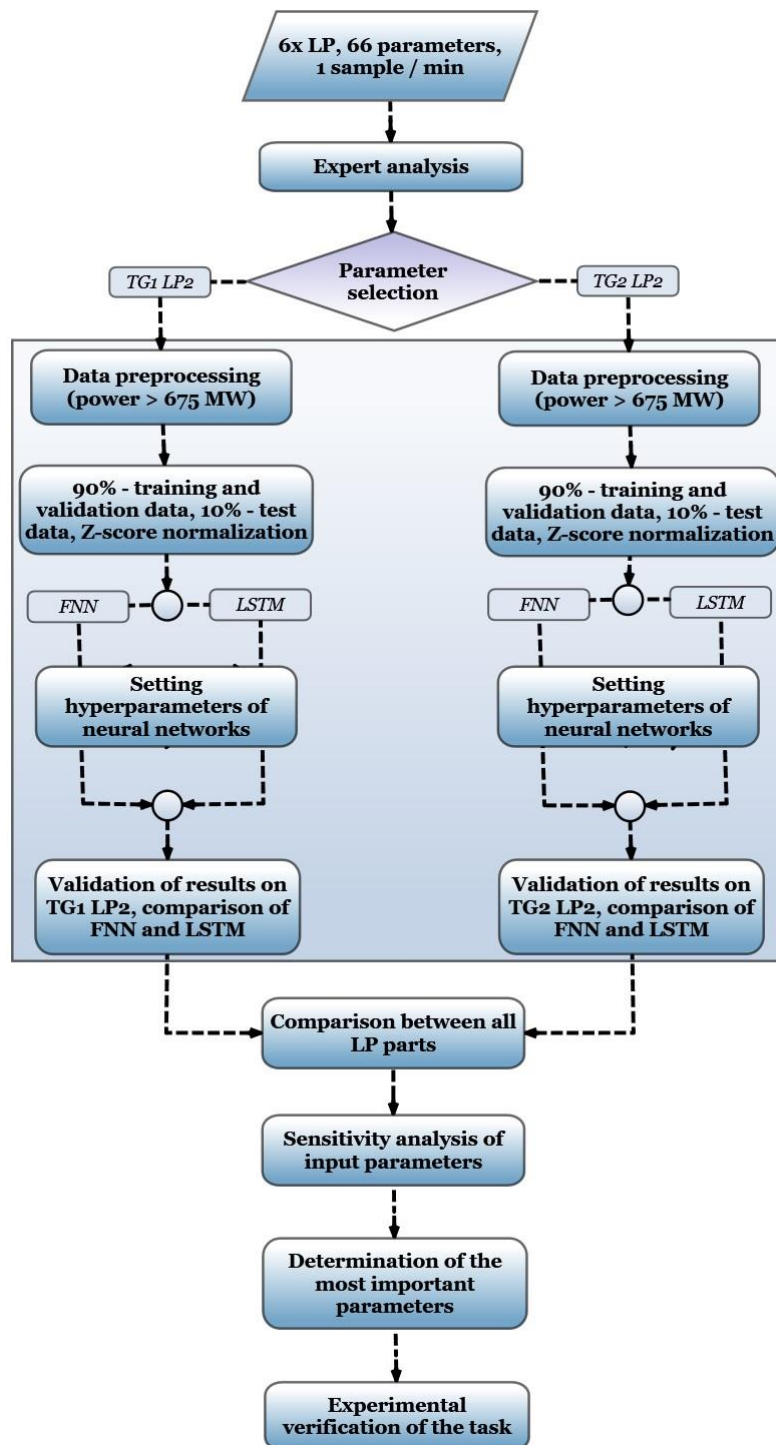
Ve chvíli, kdy byla vybrána vstupní množina 66 parametrů, bylo možné zahájit tvorbu hlavního neuronového modelu simulujícího chování jednotlivých NT dílů celého turbosoustrojí. Jako požadované výstupy byly zvoleny tlakové a teplotní veličiny na výstupech příslušných NT dílů. Cílem bylo vytvořit odpovídající neuronové modely všech 6 NT dílů, jejich následné kvalitativní a kvantitativní srovnání a též lokalizace vstupních parametrů, jež jsou klíčové z hlediska vlivu na hodnoty výstupních tlakových a teplotních veličin.

S ohledem na komplexnost modelovaného systému a konkrétní specifika řešené úlohy (regresní typ výstupu, systém s pamětí, učení s učitelem) byly zvoleny dvě kvalitativně odlišné architektury neuronové sítě – konkrétně neuronová síť typu LSTM (*Long Short Term Memory*) a dopředná neuronová síť s pamětí typu FNN (*Feedforward Neural Network with Memory*).

Neuronová síť typu LSTM je rekurentní síť, přičemž jejím hlavním rysem je schopnost pamatovat si krátkodobé i dlouhodobé závislosti. Tato speciální vrstva sítě je obvykle kombinována s klasickými perceptronovými vrstvami FCI (*Fully Connected Layers*) [2].

Sít' typu FNN je oproti LSTM síti koncepčně starší a využívá pouze FCI vrstev, v nichž jsou propojeny neurony ve smyslu „každý s každým“. V tomto typu síti je systémová paměť vytvářena pomocí zpětných časových vzorků vstupujících do síťových vazeb [3].

V případě obou realizovaných sítí byly pro modelování turbosoustrojí voleny dvě skryté vrstvy. Pro zvýšení výkonu (a tedy přesnosti) sítí byly provedeny preprocesní úpravy vstupních dat a též iterační optimalizace hyperparametrů neuronových modelů. Referenčním NT dílem byly v tomto případě voleny vždy prostřední ze všech dílů, kritériem optimalizace pak byla zvolena hodnota RMSE (*Root Mean Square Error*). Celkový postup práce tvorby a optimalizace neuronového modelu je znázorněn na diagramu obr. 3.

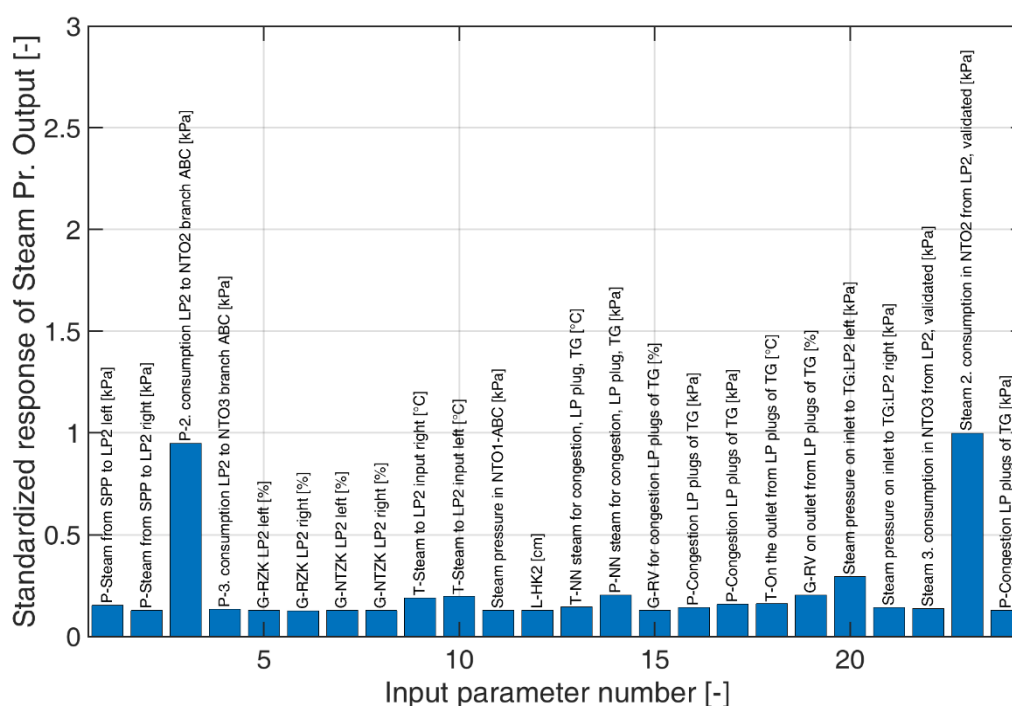


Obr. 3: Vývojový diagram pracovního postupu tvorby a optimalizace neuronového modelu

Výstupy neuronového modelu – identifikované parametry

Jak ukázaly výsledky srovnávacích analýz skutečných a predikovaných dat, naučené modely dosahovaly dostatečné úrovně prediktivních schopností a mohli tak být použity pro kvalitativní analýzu rozdílů jednotlivých NT dílů.

Uvedená kvalitativní analýza potvrdila původní předpoklady odlišného chování jednoho z NT dílů turbíny projevující se nižší hladinou tlaku vodní páry na výstupu z NT dílu. Na základě této skutečnosti byly provedeny testy citlivosti vstupních veličin, jejichž výsledkem byla identifikace 16 parametrů s klíčovým vlivem na odlišné chování zkoumaného zařízení. Citlivostní analýza byla prováděna ve smyslu metody SHAP (*Shapley Additive exPlanations*) a její kvantitativní výstup je možné vidět na obr. 4 [4].



Obr. 4: Normalizované výsledky citlivostní analýzy veličiny tlaku vodní páry na výstupu z NT dílu v závislosti na změně vstupních parametrů

Závěr

Díky dostupnosti diagnostických dat na JE Temelín podpořenému technickou znalostí turbosoustrojí byly vytvořeny neuronové modely simulující její chování. Přestože jsou jedno-tlivé turbíny a trojice jejich NT dílů konstrukčně shodné, jejich chování se liší. Neuronový model z široké škály dostupných měřených dat identifikoval 16 parametrů s vlivem na odlišné chování zařízení včetně jejich míry ovlivnění (obr. 4).

S využitím datové vědy je možné zpracovat obrovské množství dat a identifikovat anomálie. Přestože zkušený technik znalý zařízení anomálii studiem diagnostických dat rovněž nalezne, datová věda mu může ušetřit spoustu času (a souvisejících prostředků) tím, že předem vybere veličiny, které vykazují nestandardní chování. Datová věda má potenciál stát se užitečným nástrojem inženýra stejně, jako je tomu u ostatních již v praxi zavedených metod počítačového modelování.

Platnost predikcí získaných aplikací popsaného neuronového modelu byla potvrzena při odstávce JE Temelín v roce 2021.

Poděkování

Tento článek vznikl s podporou projektu Národní centrum pro energetiku, TAČR TN01000007, aplikačního Segmentu 1: Účinnost, spolehlivost, bezpečnost energetických celků, dílčího projektu TN01000007/18: Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků, pracovního balíčku Vývoj pokročilých metod komplexního hodnocení životnosti turbín.

Literatura

- [1] Crevier, D. (1993): *AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*. BasicBooks, New York. ISBN 0-465-02997-3
- [2] Hochreiter, S., Schmidhuber, J. (1997): *Long short-term memory*. Neural computation, Vol. 9, pp. 1735-1780. ISSN 0899-7667
- [3] Schmidhuber, J. (2014): *Deep learning in neural networks: An overview*. Neural Networks, Vol. 61, pp. 85-117. ISSN 0893-6080
- [4] Lundberg, S., Lee, S. (2021): *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*, [online]. Available at: <https://arxiv.org/abs/1705.07874>
- [5] Kander, L., Polcar, P. (2018): *Determination of the basic mechanical properties of selected materials from the results of small punch tests by using neural networks*. Certified Method, Lloyd's Register Quality Assurance.
- [6] The MathWorks Inc. (2021): *Deep Learning Toolbox*, [Online]. Natick, Massachusetts, United State. Available at: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/>
- [7] Świrszcz, G., Naoki, A., Aurélie, C. L. (2009): *Grouped Orthogonal Matching Pursuit for Variable Selection and Prediction*. Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 1150-1158.

SIMULACE POHYBU KLASTRU V TLAKOVÉM POLI KAPALINY

SIMULATION OF CLUSTER MOTION IN A FLUID PRESSURE FIELD

Milan Schuster

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

Abstrakt

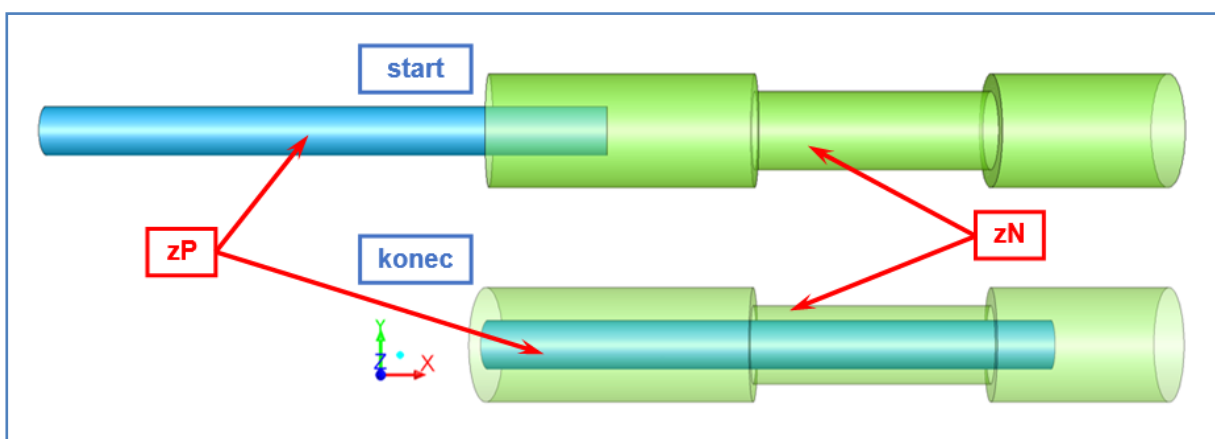
Příspěvek stručně shrnuje možnosti zadání a řešení CFD simulací proudění v modelu regulačního orgánu za vybraného pracovního režimu. Byl sestaven výpočtový model havarijního klastru reaktoru pro řešení tlakových polí při jeho zásahu za seismické události. Příspěvek popisuje podmínky simulací pohybu klastru a proudění v úzkých mezerách mezi modelem klastru a vodicím kanálem. Jsou diskutovány výsledky simulací vybraných režimů a analyzovány souvislosti simulovaných jevů interakce proudění a pohybujícího se klastru.

Abstract

The paper briefly summarizes the possibilities of entering and solving CFD flow simulations in the model of the control body under the selected operating mode. A computational model of the reactor emergency cluster was compiled for the solution of pressure fields during its intervention during seismic events. The paper describes the conditions of simulations of cluster motion and flow in narrow gaps between the cluster model and the guide channel. The results of simulations of selected modes are discussed and the context of simulated phenomena of flow interaction and moving cluster is analyzed.

Úvod

Příspěvek popisuje průběžné výsledky vývoje metodiky CFD simulací tlakových poměrů při pohybu havarijního klastru při seismické události a navazuje na příspěvek z konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách konané v roce 2020 [1]. V něm byly popsány testy základních funkcí simulace vzájemného pohybu dvou zón ve výpočtové oblasti pomocí metody „sliding-mesh“, na obr. 1 je výpočtový model klastru v obou mezních situacích při pohybu. Výpočtový model zahrnuje dvě „tekutinové“ zóny, pohyblivá zóna obsahuje klastr, nepohyblivá zóna vnitřní objem vodicí trubky kanálu, mezi oběma zónami je plocha „interfejsu“, u nepohyblivé zóny je naznačeno zúžení průřezu pro simulování seismické události.

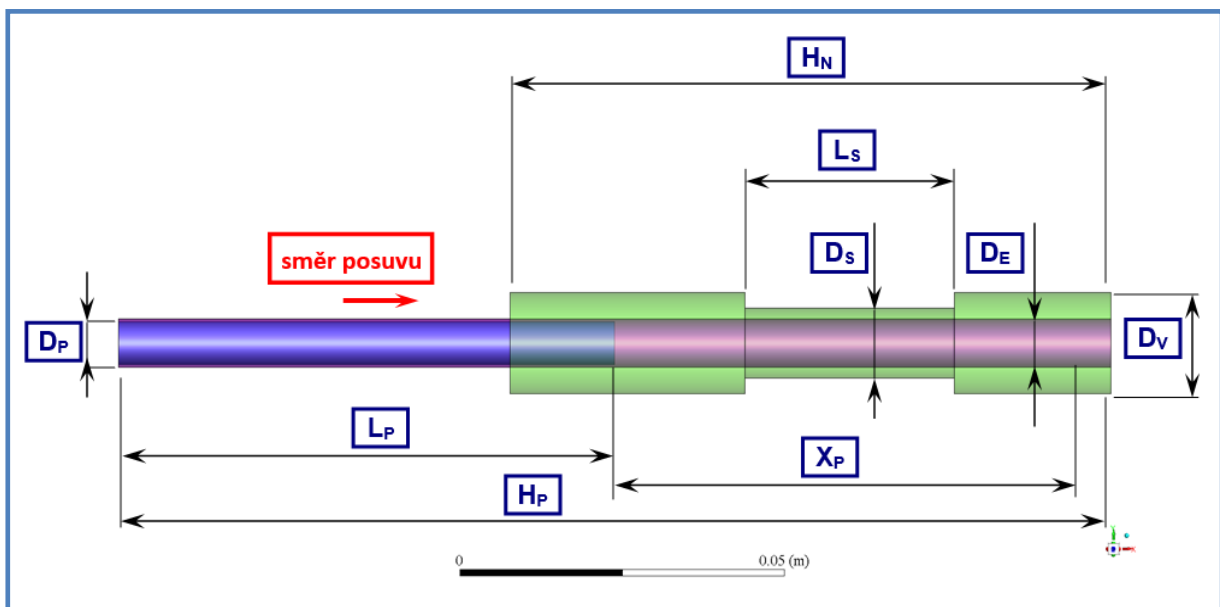


Obr. 1: Výpočtový model pohybujícího se klastru [1] – nahoře situace při startu simulace (pohyblivá zóna „zP“ s klastrem vysunuta) a dole situace při konci simulací (pohyblivá zóna „zP“ zasunuta do vodicí trubky nepohyblivé zóny „zN“), plocha interface není z důvodu přehlednosti zobrazena

Připravený výpočtový model klastru byl použit pro vývoj metodiky výpočtů tlakových poměrů v okolí pohybujícího se klastru pro modelování příčných pohybů při seismické události. Z pohledu možností CFD simulací byly příčné pohyby nahrazeny řadou různých za sebou řazených zúžení průměru kanálu. Cílem simulací je určit změny v tlakovém poli v okolí pohybujícího se klastru a vlivy působící dodatečné zatížení klastru a kapalinové odpory proti pohybu klastru za seismické situace.

Metodika simulací seismické události

Klastrem pro potřeby CFD simulací a tlakových polí za pohybu rozumíme malé válcové těleso o průměru $D_P = 9,2$ mm pohybující se ve válci vodící trubky kanálu o průměru D_V , za stabilního neseismického stavu je $D_V = 11$ mm. Seismická událost pro účely simulací je řada neperiodických relativních pohybů komponent klastru a vodícího kanálu, v jejichž důsledku se mění velikost mezery mezi klastrem a kanálem v příčném směru, kolmém na pohyb klastru. Na obr. 2 jsou uvedeny rozměry výpočtové oblasti modelu pro seismiku.



Obr. 2: Výpočtový model pro seismiku: tvarová varianta modelu klastru ve vodícím kanálu, na které jsou ukázány základní charakteristické rozměry modelů klastru: D_P = průměr válce klastru, L_P = délka válce klastru, D_E = průměr ploch interfejsů, D_V = průměr kanálu, D_S = průměr zúžení pro seismiku, L_S = délka zúžení, X_P = délka posuvu (pohybu) klastru, H_P = velikost pohyblivé zóny, H_N = velikost nepohyblivé zóny

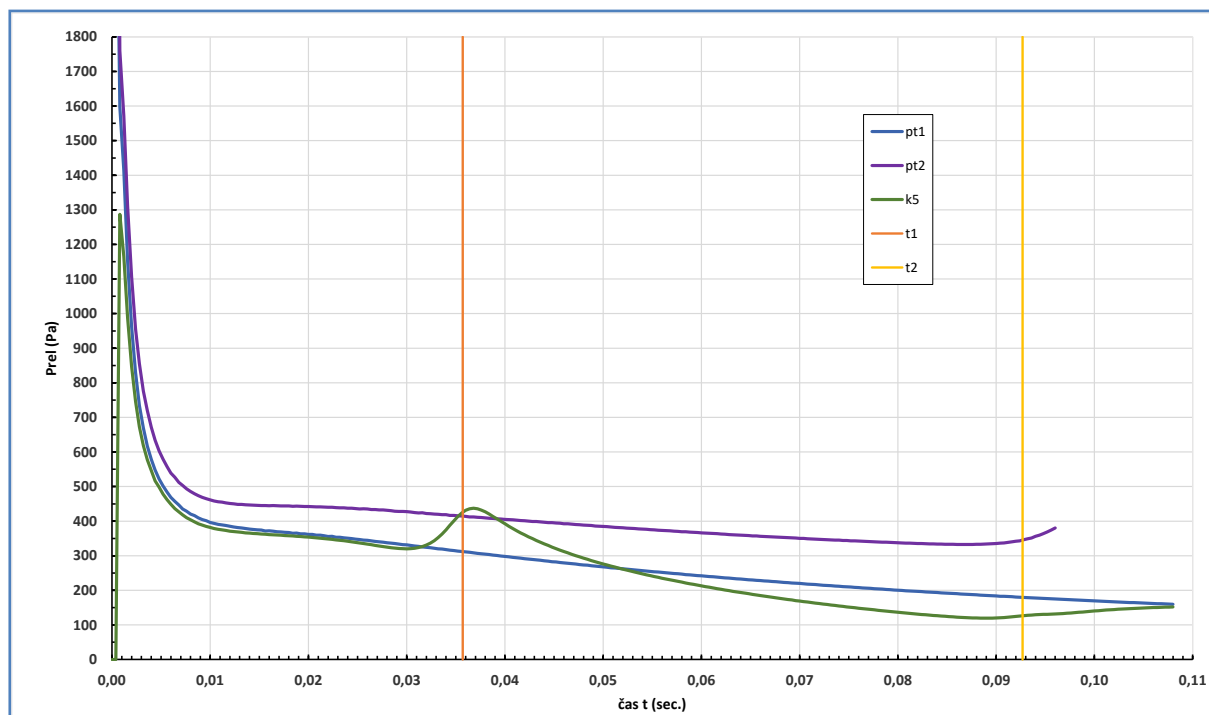
Návrh metodiky vychází z toho, že změny poměrů a tlakových polí při seismické události uvnitř kanálu havarijního klastru způsobených příčnými relativními pohyby mezi trubkou vodícího kanálu a vlastním klastrem jsou modelovány řadou za sebou řazených zúžení/rozšíření kanálu. Situace je popsána na obr. 2, kde je jedno vybrané zúžení určeno rozměry průměru D_S a délky L_S . Zařazením různých kombinací zúžení/rozšíření D_S a L_S se zahrnutím rychlosti pohybu klastru je modelováno neperiodické seismické buzení, laděním velikostí D_S a L_S lze nastavit okamžitou amplitudu a frekvenci „budícího signálu“ při seismické události. CFD simulací je pak vypočteno tlakové pole a jeho okamžité změny.

Při simulaci se klustr (jako pohyblivá zóna) postupně posouvá zadanou rychlostí ve výpočtové oblasti přes několik zúžení D_S/L_S v nepohyblivé zóně. Tím vznikají změny v tlakovém poli ve výpočtové oblasti, které odpovídají změnám ve velikosti mezery mezi klastrem a vodícím kanálem, vše zapříčiněno modelovanou seismickou situací.

Testy metodiky

V rámci řešení metodiky CFD simulací tlakového zatížení povrchu klastru za seismické události byly počítány varianty uspořádání modelu a výpočtové oblasti klastru. Různá ověřovací nastavení modelu (geometrie a rozměry zúžení D_s/L_s , rychlosti pohybu klastru) měla posoudit možnosti metodiky sledování chování klastru při seismické události. Tím vznikla řada ověřovacích výpočetních modelů klastru.

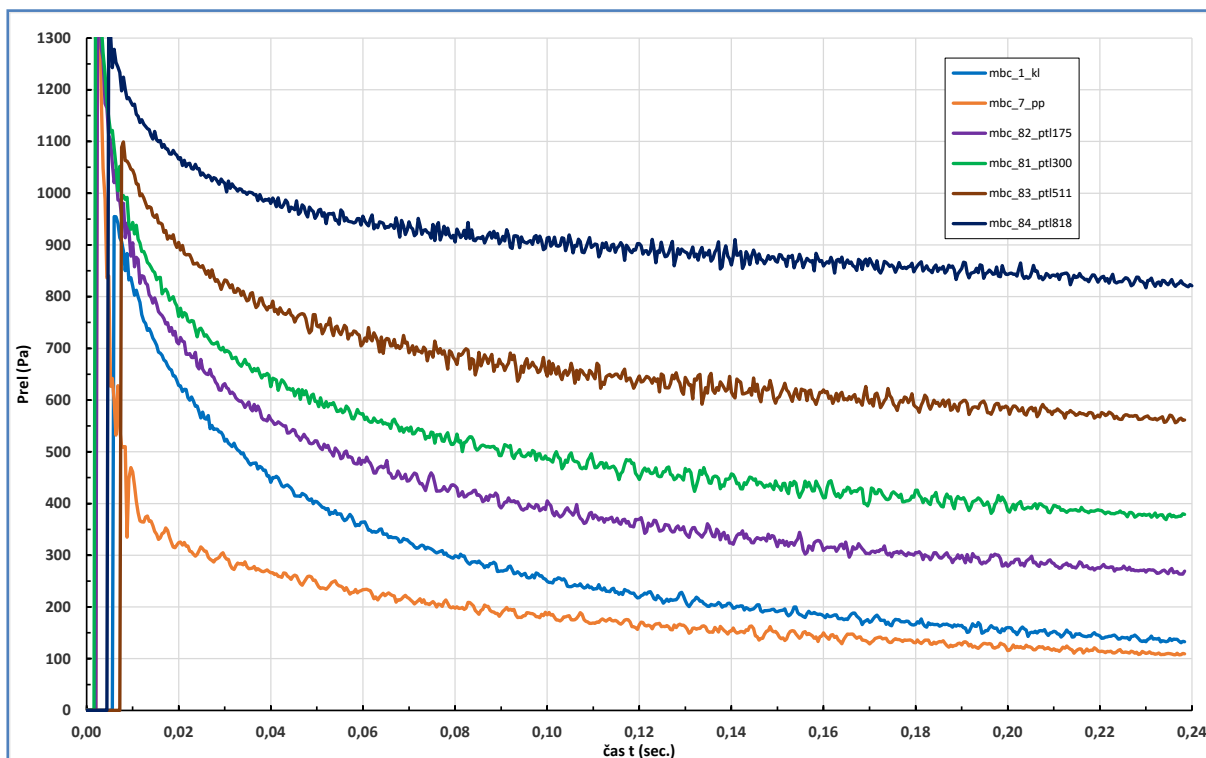
Při pohybu modelu klastru při vstupu do zúžení/rozšíření kanálu vzniká tlaková porucha na povrchu klastru. Tento „tlakový puls“ na čele klastru byl hlavním výsledkem simulací při ověřování metodiky a posuzování účinnosti jednotlivých úprav modelu na přesnost popisu odezev na seismické buzení.



Obr. 3: Průběhy čelních tlaků modelů klastru při pohybu v oblasti s větším průměrem kanálu pro kontrolní testy nastavení simulací a vlivu sítě v mezeře mezi klastrem a kanálem

Na obr. 3 je graf časových průběhů tlaků na čele modelu klastru při jeho pohybu v kanálu. Dva modely „pt-i“ reprezentují zcela hladký kanál bez zúžení pro dvě úrovně tekutinového odporu protitlaku. Model „k5“ popisuje průchod klastru jednoduchým zúžením (časové okamžiky vstupu a výstupu klastru jsou určeny svislými čarami t_1 a t_2). Z průběhů lze dovodit velikost tlakového „pulsu“ a přídavného zatížení klastru při seismice.

Na obr. 4 je ukázka časového průběhu tlaku na čele klastru při pohybu v dlouhém úzkém kanálu bez zúžení pro simulace modelů „mbc_i“ s alternativními volbami parametrů okrajových podmínek, zejm. použití nenulových hodnot „protitlaků“. Na obr. 4 jsou zobrazeny výsledky pro různé hodnoty zadaného protitlaku (který modeluje stoupající odpor tekutiny v „zaslepeném“ kanálu). Testy sestavení výpočetních modelů klastru a výsledky jejich simulací jsou popsány ve zprávě [2] včetně komentáře a postupu vývoje metodiky.



Obr. 4: Časový vývoj tlakového zatížení čela klastru pohybujícího se v úzkém hladkém válci vodícího kanálu, porovnání výsledků pro variantní zadání okrajových podmínek simulací

Závěr

Príspevek stručně shrnuje aktuální stav rozřešení výzkumu pohybu klastru a průběžné výsledky vývoje metodiky simulací tlakových polí za seismické události. Byly vytvořeny a testovány výpočtové modely základních situací při pohybu klastru ve válci vodícího kanálu s variantním nastavením okrajových podmínek s cílem přípravy metodiky CFD simulací kapalinového zatížení klastru při jeho pohybu.

Pro další vývoj metodiky se rýsují podněty pro výzkum jednak v oblasti vlastních CFD simulací pohybu pevného tělesa ve velmi úzké mezeře naplněné kapalinou a jednak v oblasti modelování pohybů klastru při seismické události (její charakteristika, např. frekvence a amplitudy příčných pohybů) s ohledem na možnosti výpočtů při simulacích.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu Institucionální podpory na rozvoj výzkumné organizace.

Literatura

- [1] Schuster, M. (2020): Klastr a simulace proudění s pohyblivou zónou. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, online, str. 15-20. ISBN 978-80-261-0959-4
- [2] Schuster, M. (2020): *Simulace proudění v regulačních orgánech energetických strojů – III. Výpočty základních režimů*. Výzkumná zpráva, VZ-46/20/009, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.

POHON TYPU LKP-M/4: NEJNOVĚJŠÍ POHON ŘÍDICÍCH TYČÍ ZE ŠKODA JS a.s.

CRDM TYPE LKP-M/4: THE NEWEST CONTROL ROD DRIVE MECHANISM FROM ŠKODA JS a.s.

Miloslav Ruchař, Igor Martinec a Jiří Hus

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

Abstrakt

Příspěvek prezentuje vývoj nejnovější generace lineárního krokového pohonu typu LKP-M/4. Nový pohon byl vyvinut současně s jeho elektronikou tak, aby byla zajištěna plná kompatibilita řešení s projekty nových jaderných bloků VVER 1200 i s dosud provozovanými bloky VVER 1000. Klíčová řešení a hlavní přínosy nového pohonu LKP-M/4 pro jeho koncové uživatele představují robustnost řešení čidla ukazatele polohy, které je funkční i v případě výskytu jednoduché poruchy ve vinutí čidla, možnost redundantní indikace dolní koncové polohy řídicí tyče jako zdvojení bezpečnostní funkce pohonu, dále zjednodušení přírubového spoje čidla pro zkrácení časů během jeho utěšňování v průběhu pravidelných odstávek, zvýšenou odolnost proti opotřebení u klíčových komponent pohonu s vlivem na jeho celkovou životnost a v neposlední řadě i novou generaci řídicí a vyhodnocovací elektroniky. Projekt vývoje byl realizován ve spolupráci firem ŠKODA JS a.s., ZAT a.s. a COMTES FHT a.s. pod záštitou programu „Aplikace“ vyhlášeného Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Abstract

The contribution deals with the development of the newest type of linear step control rod drive mechanism (CRDM) type LKP-M/4. The new CRDM was developed together with its electronics to assure full compatibility with new project of power plants VVER 1200 as well as for former power plants VVER 1000. Key solutions and benefits of new LKP-M/4 for its user are robustness of position indicator that assures control rod position indication even after the single failure occurrence in the indicator wiring, redundant indication of the control rod lower safety position, simplification of flange connections to reduce maintenance time, increase of material wearing resistance of key components limiting the mechanical lifetime and finally new state of the art generation of electronics to control power circuits as well as the position indicator. Project was done in cooperation of companies ŠKODA JS a.s., ZAT a.s. and COMTES FHT a.s. under program “Aplikace” of Ministry of Industry and Trade, Czech Republic.

Pohony regulačních orgánů ŠKODA JS a.s.

Pohony regulačních orgánů pro nejrůznější typy reaktorů si dlouhodobě drží klíčovou roli v portfoliu stabilně dodávaných produktů firmy ŠKODA JS a.s. Firma má vlastní ověřené řešení jak pro školní a výzkumné reaktory, tak pro energetické reaktory typu VVER.

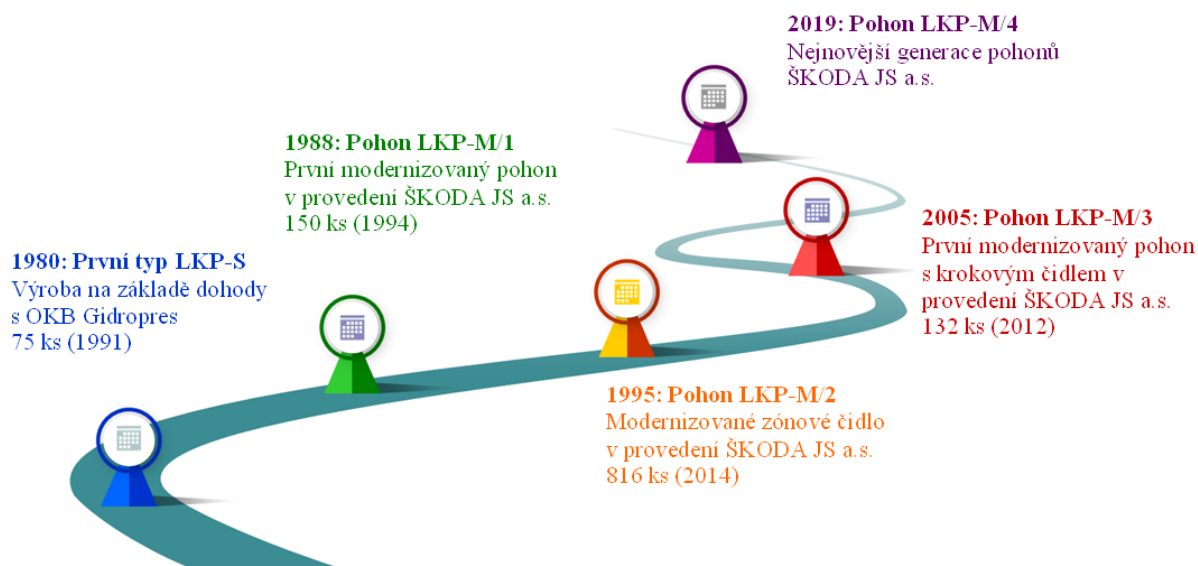
V současné době ve výrobních prostorách firmy převládá především produkce modernizované verze pohonů typu PRO-M, které jsou určené pro reaktory VVER 440/V213 a jejich modernizované provedení nabízí v základu projektovou životnost pohonu 25 let. Pro aktuálně provozované bloky s tímto typem reaktoru, jejichž původní projektová životnost se dnes ze 30 let prodlužuje na cílových 50–60 let, to představuje spolehlivé a ověřené řešení jednoho z klíčových prvků reaktorového zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost. ŠKODA JS a.s. úspěšně dodala tyto pohony na JE Paks, JE Mochovce, JE Bohunice, JE Dukovany a v současné době běží výroba zakázky pro JE Rovno.

V budoucnu se dá předpokládat postupné snižování poptávky po těchto pohonech a firma se proto již nyní soustřeďuje na svůj další klíčový typ pohonu, konkrétně lineární krokový pohon LKP-M nejmodernější generace 4, jehož klíčová vylepšení jsou popsána v příspěvku.

Pohony typu LKP-M vyráběné ve ŠKODA JS a.s.

Historie výroby pohonů LKP-M

Výroba pohonů typu LKP-M ve ŠKODA JS a.s. sahá až do 80. let 20. století a celý chronologický vývoj jednotlivých generací pohonů je shrnut na následujícím obrázku.



Obr. 1: Historie vývoje pohonů LKP-M ve ŠKODA JS a.s.

Z přehledu je patrné, že firma dlouhodobě a systematicky pracuje na postupných inovacích a modernizacích řešení lineárních krokových pohonů.

Pohon nejnovější generace typu LKP-M/4

Tento pohon je určen pro provoz jak na reaktorech typu VVER 1000, tak i na nově budovaných blocích s reaktory typu VVER 1200.

Při dodržení kompatibility řešení pohonu s reaktorovým zařízením i s kabelovými trasami elektrárny nabízí řešení tohoto pohonu některá unikátní konstrukční řešení, která jsou chráněna patentem nebo užitnými vzory.

Za hlavní zmínku stojí provedení uzlu ukazatele polohy. Řešení tohoto uzlu zcela zásadním způsobem zvýšilo odolnost vůči výskytu jednoduché poruchy ve vinutí čidla ukazatele polohy, kde v závislosti na místo výskytu případné poruchy buď nedojde vůbec k vlivu na funkci uzlu, nebo dojde v nejhorším případě ke změně rozlišovací schopnosti čidla z původních 20 mm na 100 mm. Vzhledem k tomu, že u předchozích pohonů do jejich 2. generace bylo dostatečné indikovat změnu polohy regulačního orgánu po výškových zónách 350 mm, je i taková změna rozlišení pro bezpečný provoz reaktoru naprosto dostatečná a pro provozovatele to znamená zásadní zvýšení robustnosti uzlu, které v konečném důsledku nenutí provozovatele v případě výskytu takové poruchy zasahovat do výkonu bloku.

Dalším zlepšením čidla je možnost nezávislé (redundantní) indikace dolní koncové polohy regulačního orgánu v aktivní zóně reaktoru, což je bezpečnostní funkce pohonu, pomocí galvanicky odděleného kanálu. Řešení čidla společně s vyhodnocovací elektronikou, kterou vyvinula společnost ZAT a.s., nabízí i mnoho dalších výhod z hlediska podrobných informací o poloze regulačního orgánu, jeho změnách při regulaci výkonu bloku, nebo i obdobné řešení redundantní indikace horní koncové polohy regulačního orgánu. Při vývoji bylo pamatováno i na

další faktory, jako je snížení počtu dílů, snížení nároků na čas přípravy pohonu během pravidelných odstávek bloku a možnost automatizovaného utahování jeho přírubových spojů pomocí elektronicky řízených utahovacích jednotek řady EZ, které společnost ŠKODA JS a.s. rovněž úspěšně dodává na provozované elektrárny s různými typy reaktorů VVER.



Obr. 2: Pohon LKP-M/4

Tab. 1: Porovnání klíčových parametrů vybraných typů pohonů

Typ pohonu	ŠEM-3	LKP-M/3	LKP-M/4
Výrobce	Gidropress Rusko	ŠKODA JS a.s. Česká republika	ŠKODA JS a.s. Česká republika
Dvojný chod (DCH) Kroky	8000 -	6000 2 100 000	min 10 500 *) 4 000 000 *)
Pády ZT	500	300	500 *)
Počet kroků (zdvih max.)	195 (3900)	191 (3800)	min. 195 (min 3900)
Počet kroků (pracovní zdvih)	185 (3700)	185 (3700)	185 (3700)
Celková životnost (roky)	30	40	min. 40 **)
Počet vodičů čidla	max. 12	18	12
Přírubové spoje v oblasti čidla	1	2	1

*) / **) Údaj ověřený: životností zkouškou na kanálu ve ŠKODA JS a.s. / kvalifikací

Řadou modernizací prošly i další konstrukční uzly pohonu s cílem zjednodušit jejich řešení, zvýšit odolnost a životnost a v neposlední řadě i snížit nároky na jejich údržbu a pravidelnou obsluhu během odstávek bloků. Jako jeden z příkladů z této oblasti je uvedena modernizace přírubového spoje pro připojení čidla ukazatele polohy v horní části konstrukce pohonu.



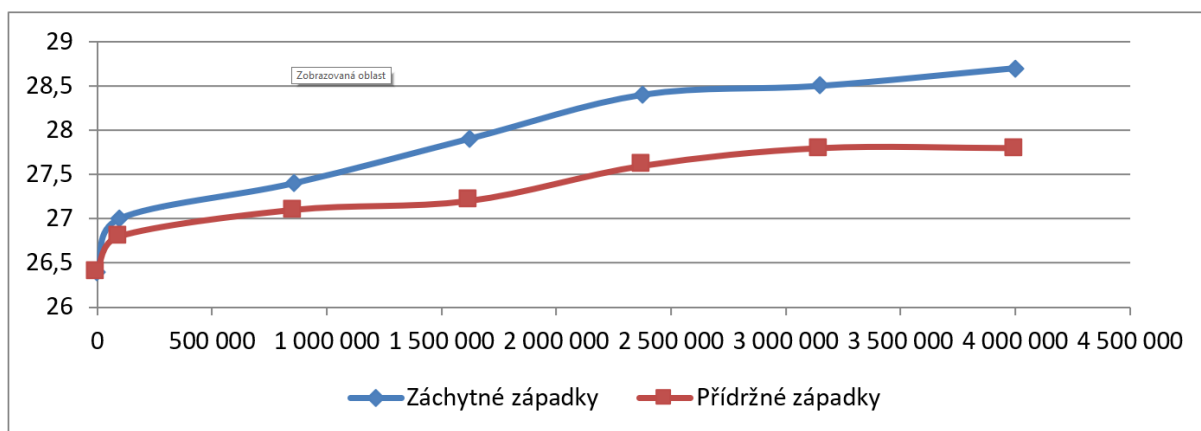
LKP-M/3:



LKP-M/4:

Obr. 3: Porovnání konstrukce přírubových spojů čidla polohy

Další modernizací prošel uzel západek, tedy klíčový kinematický prvek pohonu, kde byl ponechán osvědčený princip řešení a změny byly provedeny především v oblasti materiálů komponent. Díky nim bylo v rámci životnostního testu dosaženo výrazné zvýšení životnosti tohoto uzlu, který je i limitním uzlem mechanické odolnosti celého pohonu.



Obr. 4: Průběh opotřebení západek během životnostního testu pohonu (max. limit nebyl dosažen a reálně má uzel vyšší životnost)

Závěr

Věříme, že nový pohon LKP-M/4 je plně připraven jak pro plánované výměny provozovaných pohonů typu LKP-M po dosažení jejich životnosti na blocích typu VVER 1000, tak i do projektů nových bloků s reaktory typu VVER 1200. Vývoj pohonu LKP-M/4 probíhal v rámci dotačního programu „Aplikace“ vyhlášeného Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky ve spolupráci s firmami ZAT a.s. a COMTES FHT a.s., a byl realizován v souladu s nejnovější legislativou platnou v Evropské unii pro tento typ produktu.

STEND INSPEKČÍ PALIVOVÝCH SOUBORŮ

FUEL ASSEMBLY INSPECTION STAND

Miloslav Ruchař

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

Abstrakt

Příspěvek prezentuje nové zařízení ŠKODA JS a.s, které je určeno k provádění provozních kontrol ozářených palivových souborů na jaderných elektrárnách. Stend inspekci palivových souborů (dále jen SI-PS) je v případě projektu VVER-1000/V-320 navržen pro provoz v prostoru sekce havarijního vyvezení jaderného paliva ve skladovacím bazénu na reaktorovém sále. Tato koncepce s výhodou umožňuje provádět inspekce palivových souborů při současném provozu zavážecího stroje v ostatních částech bazénu skladování paliva bez dopadu do harmonogramu odstávky bloku, použité principy však lze upravit a implementovat i na bloky jiného designu.

Zařízení je dálkově ovládáno z řídicího pultu a je vybaveno antikolizním systémem s vazbou na řízení pohybu zavážecího stroje. Tento systém umožňuje zajetí pracovní tyče zavážecího stroje do pracovního prostoru zařízení SI-PS, a tím umožňuje průběžnou výměnu inspektovaných souborů. Celková kapacita kontrolovaných souborů tak není omezena kapacitou mříže havarijního vyvezení, ale pouze časem vymezeným pro tyto kontroly v rámci odstávky bloku, s ohledem na další prováděné činnosti.

Zařízení SI-PS umožňuje provádět vizuální inspekci vnějších povrchů pomocí high-rad kamer a geometrickou inspekci v rozsahu měření hodnoty zkrutu, průhybu a měření délky palivových souborů. Pro tento účel zařízení zajišťuje i potřebnou manipulaci s kontrolovaným palivovým souborem v prostoru nad absorpční trubkou kompaktní mříže. Modulární koncepce zařízení je řešena tak, aby do budoucna bylo možné rozsah prováděných kontrol i dále rozšířit. Provozovatelům energetických bloků toto zařízení poskytne cenné informace o provozním stavu palivových souborů s výrazně nižšími nároky na čas jejich provedení, oproti dosavadnímu typu zařízení tedy ve výrazně vyšší počet zkontrolovaných souborů během odstávky a s vyšší kvalitou získaných dat, která odpovídá současnému stavu techniky v této oblasti.

Abstract

This contribution deals with a new device of ŠKODA JS a.s., which is designed for inspections of irradiated fuel assemblies at nuclear power plants. In the case of the VVER-1000/V-320 project, the fuel assembly inspection stand (hereinafter referred to as SI-PS) is designed for operation in the area of the emergency fuel storage section in the storage pool in the reactor hall. This advantageous concept allows fuel assemblies inspections to be performed while the fuel handling machine is operating in other parts of the fuel storage pool without impact on the unit outage schedule. However, the principles used can be adapted and implemented for NPP units of other designs too.

The device is remotely controlled from a control panel and is equipped with an anti-collision system linked to the motion control of the fuel handling machine (FHM). This system allows the FHM work column to get to the working area of the SI-PS, thus enabling the continuous exchange of inspected assemblies. Therefore, the total capacity of the inspected assemblies is not limited by the capacity of the emergency storage rack, but only by the time allocated for these inspections during the unit shutdown, taking into account other activities being carried out.

The SI-PS device allows visual inspection of the external surfaces using high-rad cameras and geometric inspection of torsion, deflection and length of the fuel assembly. For this purpose, the device also provides the necessary handling of the inspected fuel assemblies in the area above the storage rack absorption tube. The modular concept of the device is designed so that the range of inspections can be extended in the future. This device will provide power plant operators with valuable information on the operational status of fuel assemblies with significantly lower time requirements, i.e. a significantly higher number of assemblies inspected during an outage compared to the existing device, and with a higher quality of data obtained, which corresponds to the current state of the art in this field.

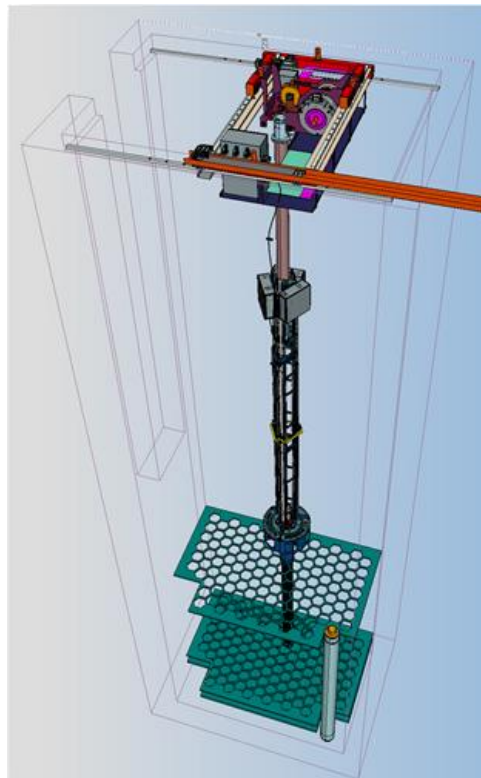
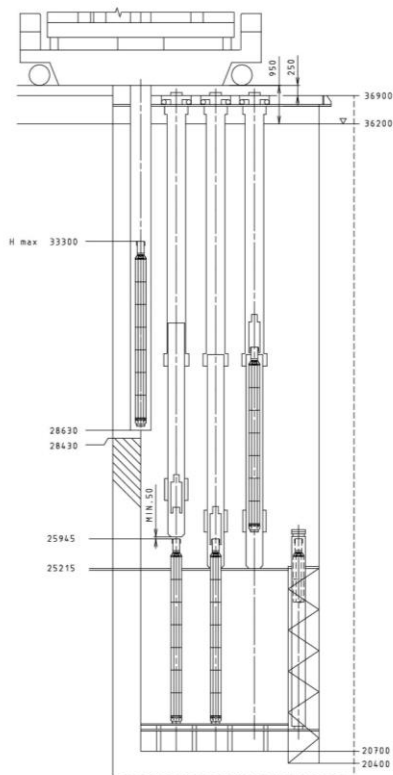
Inspekce palivových souborů – inovativní řešení vyvinuté ve spolupráci ŠKODA JS a.s. a ČEZ, a. s.

Inspekce palivových souborů (PS) byly na jaderné Elektrárně (JE) Temelín prováděny pomocí zařízení MSIO – mobilní stend inspekcí a oprav. Zařízení se instalovalo do prostoru šachty B04, která je určena pro transport čerstvých PS i pro vyvážení použitých PS do obalových souborů, respektive jako montážní šachta pro ZS → kolize více technologií v jednom prostoru s vlivem na HMG odstávky. Zařízení MSIO bylo využíváno pro vizuální kontrolu vnějších povrchů PS, měření průhybu, zkrutu a délky PS v odloženém stavu, měření tloušťky oxidické vrstvy na palivových proutcích (PP), kontrolu těsnosti palivových proutků nepřímou UZ metodou v případě demontáže palivové hlavice.

Zařízení je v provozu od zahájení provozu JE Temelín od roku 2001 a provozovateli jaderné elektrárny přináší velmi cenné informace o stavu provozovaných palivových souborů. Pro udržitelnost jeho provozu do dalších kampaní elektrárny však bylo nutné řešit i potřebné investice do údržby zařízení MSIO. Na straně inženýringu ČEZ, a. s. proto vznikl velmi zajímavý nápad na prověření nové koncepce zařízení a přesunutí inspekcí PS do jiného prostoru bazénů skladování paliva, a to do sekce B02 bazénů skladování a výměny paliva (BSVP). Takovým řešením by vznikla nová možnost provádět inspekce PS nezávisle na činnostech v šachtě B04, na větším počtu PS, paralelně s jinými činnostmi prováděnými s PS pomocí zavážecího stroje (ZS) během odstávky a došlo by tak i ke zkrácení časů na kritické cestě odstávky bloku.

Tato myšlenka ČEZ, a. s. byla ve spolupráci se ŠKODA JS a.s. rozpracována formou studie proveditelnosti, která tento záměr potvrdila z hlediska možnosti realizace nového stendu do vymezeného prostoru mezi spodní částí mostu ZS a maximální úrovní hladiny vody v B02, při plnění všech požadavků na bezpečnou manipulaci s PS. Výsledkem studie byly hlavní návrhové limity, normativně legislativní požadavky na realizaci stendu a jeho koncepční řešení ve 3D modelu (viz obr. 1).

Během návrhu konceptu byla současně provedena patentová rešerše na stav techniky s cílem získání cenných informací o řešení podobných systémů ve světě a pro zajištění patentové čistoty nového návrhu. Na základě jejích výsledků bylo rozhodnuto o potřebě patentové ochrany nového stendu, následně byla zpracována a podána patentová přihláška a společný patent společností ŠKODA JS a.s. a ČEZ, a. s. pro Českou republiku a Rusko byl udělen v roce 2020. Rozšíření ochrany trhu pro Ukrajinu a evropské teritorium ještě probíhá v současné době.



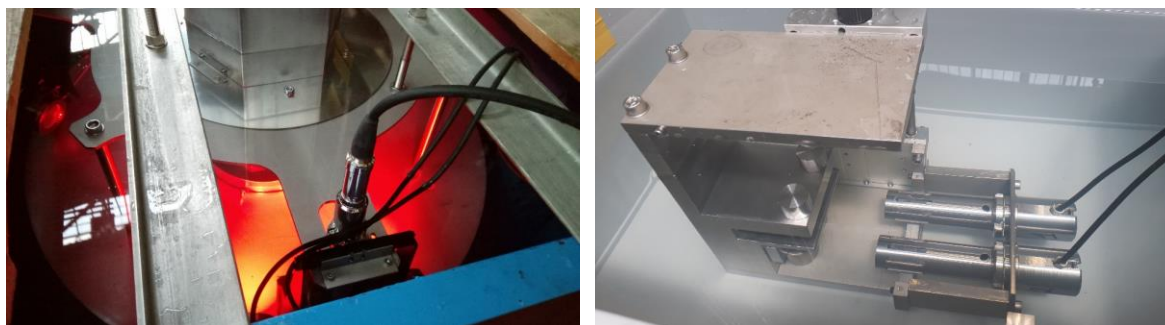
Obr. 1: Zadání prostorových požadavků pro návrh SI-PS a vzniklý konceptní návrh

Funkce, účel a hlavní technické parametry

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

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

Uvedené parametry systémů vizuelní kontroly i rozměrové kontroly PS byly nejprve podrobně prověřeny na vybraných klíčových komponentách nového stendu na počátku projektu, a to formou zkoušek na maketách imitujících budoucí konstrukční řešení stendu v simulaci provozních podmínek inspekcí v bazénu B02 (bez vlivu radiace).



Obr. 2: Ověření klíčových komponent systémů vizuální kontroly i měření geometrie PS na maketách ve ŠKODA JS a.s.

Zkoušky na maketách potvrdily správnost zvolené koncepce a umožnily podrobné rozpracování konstrukce stendu, v jehož řešení je již od začátku uvažován modulární princip řešení jeho částí pro možnost budoucího rozšiřování prováděných inspekcí.

Součástí řešení je i integrovaný antikolizní systém, který umožňuje zajetí ZS do prostoru bazénu B02 při zajištěné parkovací poloze SI-PS. Díky tomuto řešení je umožněna průběžná výměna vybraných PS v B02 pomocí ZS v době provádění jejich inspekce a počet kontrolovaných PS je tak omezen pouze na určený časový prostor, nikoliv kapacitou mříže v B02.

Konstrukční části stendu inspekce

SI-PS tvoří následující části:

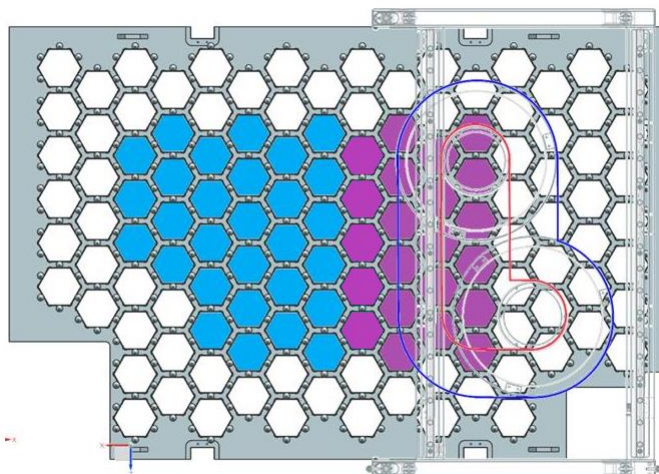
- most – zajišťuje umístění inspekčního sloupu nad vybranou buňku ve skladovací mříži a obsahuje zdvihací mechanismus pro vertikální manipulaci s PS,
- inspekční sloup – zajišťuje zachycení palivového souboru a obsahuje systémy pro provedení vizuální i geometrické inspekce PS,
- operátorské pracoviště – slouží pro ovládání celého zařízení,
- sestavy kabeláže pro propojení jednotlivých celků,
- etalon pro kalibraci inspekčních systémů,
- kolejová dráha, po které se most pohybuje nad mříží,
- transportně skladovací boxy.

Most, sloup a sestavy kabeláže jsou demontovatelné, aby mohly být samostatně transportovány na/z reaktorového sálu ve speciálních kontejnerech. Operátorské pracoviště, tvořené pultovým rozvaděčem, lze samostatně transportovat pomocí integrovaných závěsných prvků. Kolejová dráha je trvale nainstalována na každém bloku.

Architektura řídicího systému je založena na průmyslovém PC s realtime systémem. Součástí zařízení je i bezpečnostní systém, který pracuje nezávisle na řídicím systému. Pracoviště operátora je umístěno na roštovém poli vedle skladovacího bazénu a slouží pro ovládání všech systémů celého zařízení.

Montáž stendu a přípravy před inspekci PS

Před montáží SI-PS a zahájením inspekce se nejprve pomocí ZS umístí PS do mříže v bazénu B02 na pozici v tzv. zakryté zóně (kapacita 22 míst), kde po montáži SI-PS již není přístup pro jejich průběžnou výměnu. Další pozice v mříži tvoří tzv. výměnná zóna (kapacita 29 míst), kde je možné PS umístit i po montáži SI-PS a popřípadě provádět jejich průběžnou výměnu.



Obr. 3: Znárodnění zakryté (fialová) a výměnné (modré) zóny v mříži B02

Montáž SI-PS je navržena s důrazem na minimalizaci potřeby manipulací pomocí polárního jeřábu, minimalizaci montážních operací prováděných na reaktorovém sále a snížení potřeby skladovacích ploch v tomto místě na minimum. Montáž probíhá v následujícím pořadí operací:

- transport mostu a pultu z pomocné budovy na reaktorový sál (RS),
- ustavení mostu na koleje nad bazén B02,
- zapojení kabeláže a oživení systému,
- nastavení mostu a kočky do pozice pro montáž sloupu,
- transport sloupu z pomocné budovy na RS do mostu (po uchopení polárním jeřábem v koridoru se umísťuje rovnou do mostu),
- zapojení kabeláže mezi sloupem a mostem,
- ověření všech funkcí systému.



Obr. 4: Vlevo montáž mostu na koleje, vpravo montáž sloupu do mostu SI-PS

Po prověření správnosti montáže a funkcí systému se provede ověření kalibrace měřicího systému geometrie PS pomocí měřicího etalonu a ověří se funkčnost televizního systému.

Postup inspekci PS

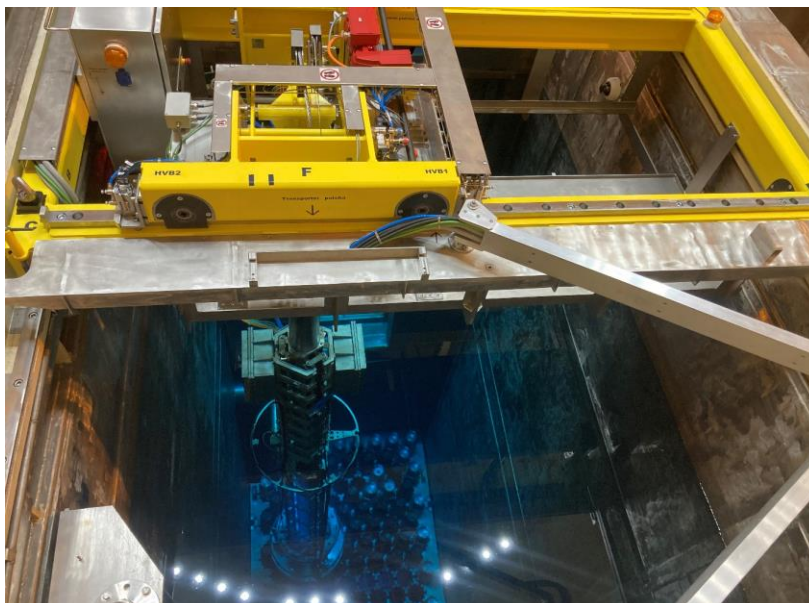
Inspekce jednotlivých PS pomocí SI-PS probíhají v pořadí určeném dle požadavků provozovatele, přičemž se využívají data ze ZS o pozicích jednotlivých typů PS v mříži v bazénu v B02. Po najetí mostu nad příslušný koordinát mříže se nejprve zabezpečí jeho poloha. Po spuštění inspekčního sloupu na mříž se příslušný PS zachytí pomocí zachytu, jehož koncepce je převzata z ověřeného řešení ze ZS. Po zahájení zdvihu PS začne typová inspekce PS složená z vizuální a rozměrové kontroly. Vizuální kontrola se provádí automaticky na prvních třech stranách PS pomocí kamer SI-PS, záznam je průběžně vyhodnocován operátory a ukládán do DTB videoservertu. Koncová poloha zdvihu PS je fyzicky omezena, a zachycený PS proto nelze

zvednout nad povolený výškový limit, který je definován s ohledem na bezpečnost personálu a radiační situaci na reaktorovém sále.

Po zdvižení PS z mříže se provede změření jeho délky a systém kontroly zkrutu a průhybu provede automatické proměření těchto geometrických hodnot včetně grafického vyhodnocení.

Po kontrole geometrie se kamerový systém SI-PS ustaví do polohy pro vizuální kontrolu zbylých 3 stran PS, která proběhne rovněž v automatickém režimu během spouštění PS zpět do mříže. Tímto krokem je ukončena typová kontrola PS, na kterou může v případě potřeby navázat podrobná vizuální kontrola vybraných míst na povrchu PS.

Po ukončení kontrol na zvoleném PS se odpojí záchyt SI-PS z hlavice PS a sloup se zdvihne z mříže do pozice pro přejezd na následující koordinát.



Obr. 5: SI-PS v bazénu B02 během inspekce PS



Obr. 6: SI-PS – pohled na operátorský pult

Demontáž SI-PS a jeho uskladnění

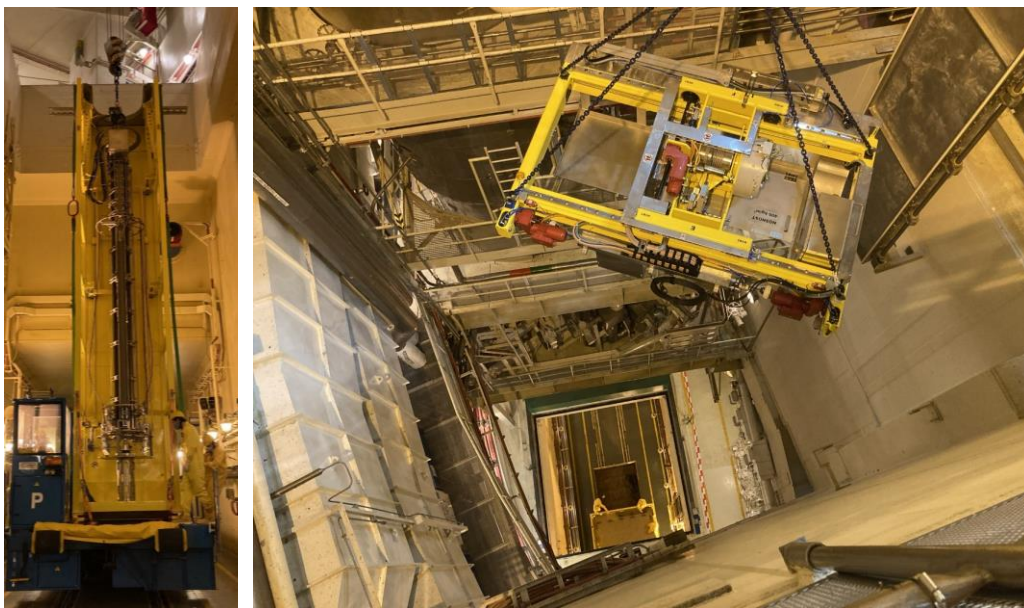
Demontáž SI-PS probíhá v obráceném postupu montáže s doplněním, že se na dílech provádí opatření proti šíření kontaminace, měří se radiační situace a provádějí se dekontaminační po-

stupy. Inspekční sloup lze během demontáže z bazénu B02 zakrýt do ochranné fólie a dekontaminace jeho povrchu ostřikem se provede na určeném místě v šachtě B04. Současně se fólií chrání povrchy mostu, kabeláže i povrchy na reaktorovém sále. Inspekční sloup se po dekontaminaci a oschnutí transportuje koridorem do transportně skladovacího boxu, pomocí kterého se vrátí na určené skladovací místo v budově aktivních pomocných provozů (BAPP).

Po transportu sloupu se provede kontrola radiační situace ostatních částí SI-PS, v případě potřeby se provede dekontaminace povrchů předepsaným způsobem ještě na reaktorovém sále a následně se díly transportují koridorem do transportně skladovacích boxů a na BAPP.

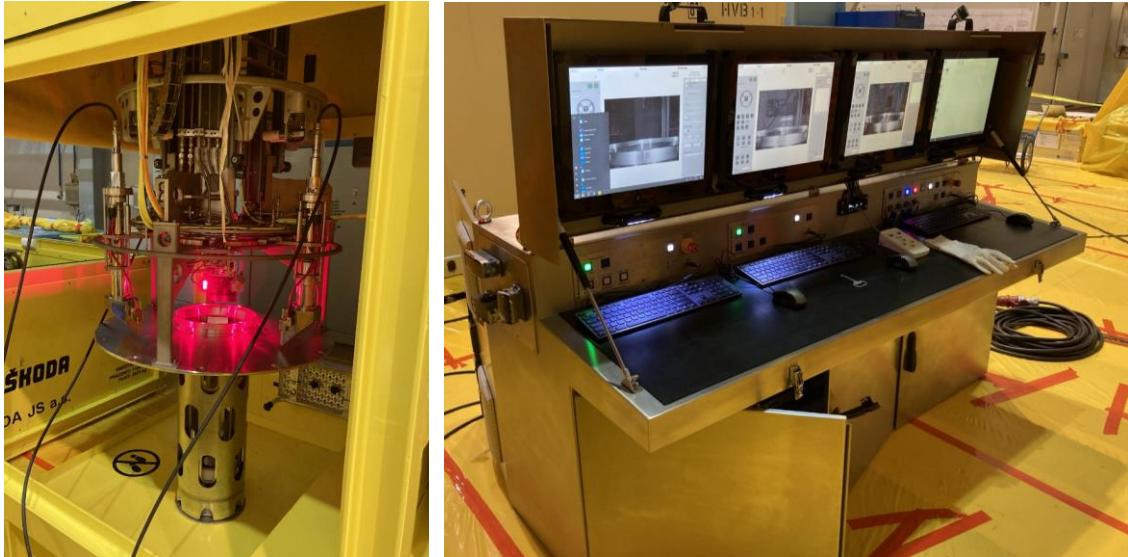


Obr. 7: Demontáž inspekčního sloupu z B02 a jeho dekontaminace oplachem



Obr. 8: Vlevo transport inspekčního sloupu, vpravo transport mostu koridorem

Na uskladněných částech SI-PS v prostorách BAPP lze v průběhu provozní kampaně bloku provádět údržbu i kontrolní činnosti dílčích funkcí jednotlivých uzlů.



Obr. 9: Kontrola funkce TV kamer během uskladnění v BAPP

Výhody SI-PS vyhodnocené na základě prvních zkušeností z inspekci

Zkoušky SI-PS proběhly na obou výrobních blocích elektrárny Temelín během roku 2021 a byly rozděleny na 2 etapy, tzv. neaktivní a aktivní zkoušky. Neaktivní zkoušky byly provedeny pomocí imitátoru PS a etalonu na kalibraci systému měření geometrie. Aktivní zkoušky proběhly již s ozářenými PS. Zkouškami byla podrobně prověřena funkčnost zařízení i kompatibilita s technologiemi elektrárny. Z jejich výsledků lze již dne hodnotit zásadní přínosy zařízení SI-PS zejména v těchto oblastech:

- výrazné zkrácení časů montáže i demontáže a splnění zadaných limitů zákazníkem;
- podstatně jednodušší montáž i demontáž zařízení v podmínkách reaktorového sálu, jednoduché operace během dekontaminace dílů, což přispívá k výraznému snížení kolektivních dávek personálu elektrárny (zásady ALARA);
- splnění časového kritéria typové kontroly PS do 1 hodiny;
- zvýšení přesnosti výsledků měření geometrie PS;
- zvýšení kvality obrazových záznamů a komfortu jejich zpracování.

Tab. 1: Časové nároky – montáž, demontáž zařízení

Činnost [hod.]	MSIO	SI-PS	Úspora
Montáž	43	7	-36
Demontáž	45	11	-34

Tab. 2: Časové nároky – kontroly PS

Činnost [hod.]	MSIO	SI-PS	Úspora
Kontrola PS	< 12	< 1	až -11

Závěr

Závěrem lze konstatovat, že zařízení SI-PS při svém prvním ostrém nasazení v podmínkách výrobních bloků Elektrárny Temelín potvrdilo stanovené cíle, které byly jeho provozovatelem definovány jako podmínky realizace investičního záměru a prokázalo své nesporné výhody oproti dosavadnímu inspekčnímu zařízení. Kvalita a rozsah získaných dat o stavu provozovaných PS jsou důležitou částí bezpečného provozování jaderné elektrárny.

KONTROLY JADERNÉHO PALIVA

NUCLEAR FUEL INSPECTIONS

Martina Malá ^{a)}, Marcin Kopec ^{a)}, Vítězslav Matocha ^{b)} a Ondřej Pašta ^{a)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Ke komponentám a zařízením, které prochází pravidelnými kontrolami během odstávek bloků jaderných elektráren, patří i jaderné palivo. I když je palivo v reaktoru jen několik let, je velmi důležité monitorovat jeho stav a chování, neboť má vliv na bezpečný a spolehlivý provoz bloku. Předložený článek popisuje, jakým způsobem je palivo monitorováno během odstávek bloků jaderných elektráren. Ke sledovaným parametrům patří rozměrová stabilita palivových souborů, korozní stav pokrytí palivových proutků a komponent palivových souborů a celkový vzhled palivových souborů.

Abstract

Nuclear fuel belongs to components and installations that are inspected during refuelling outages of nuclear power plants. The nuclear fuel stays in a reactor core only few years, but it is still important to monitor its status and behavior, because it influences a safe and reliable operation of the unit. Given paper describes the way of nuclear fuel monitoring during the outages of power plants. Among monitored parameters, there are dimensional stability of fuel assemblies, corrosion status of a fuel rod cladding and fuel assembly components, and overall looks of fuel assemblies.

Důvody monitorování paliva během odstávky bloku

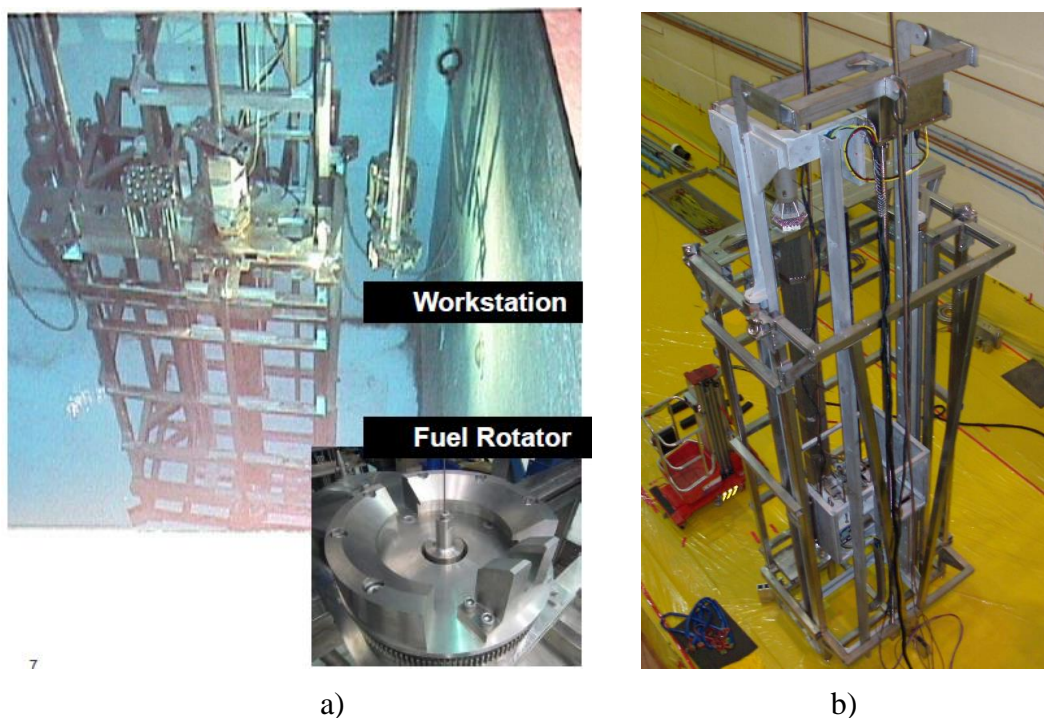
Pro provoz jaderné elektrárny je důležité zajistit bezpečný a spolehlivý provoz reaktoru, a proto je důležité efektivně monitorovat také stav paliva, které se v reaktoru nachází a které během provozu pracuje za vysokých teplot, tlaků a průtoku chladiva reaktorem. U reaktorů provozovaných v ČR, tedy VVER-440 (V213) se jedná o parametry 267-297 °C, tlak 12,3 MPa a průtok aktivní zónou 42.000 m³/h a u VVER-1000 (V320) o parametry 290-320 °C, tlak 15,7 MPa a průtok aktivní zónou 85.000 m³/h [1].

V průběhu provozu dochází k vyhořívání paliva a souvisejícím změnám, dochází nejenom k úbytku štěpného materiálu uvnitř palivových tablet, ale také ke změnám souvisejícím s obdrženou dávkou (změny na úrovni mikrostruktury materiálu), které ovlivňují také rozměrovou stabilitu palivových souborů. Ozáření ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu pokrytí palivových proutků (pevnost v tahu, tvárnost, creep) i rozměrovou stabilitu palivových souborů. Dochází k průhybu, zkrutu a růstu palivových souborů. Svůj vliv má také okolní prostředí, tedy chladivo. Během provozu dochází na pokrytí paliva k tvorbě oxidické vrstvy, která snižuje přestup tepla z paliva do chladiva a ovlivňuje mechanické vlastnosti pokrytí. Na pokrytí může docházet k úsadám, které mohou ovlivňovat rozložení výkonu v aktivní zóně, tvorbu oxidické vrstvy a přestup tepla z paliva do chladiva (tedy výslednou teplotu pokrytí). Průtok chladiva aktivní zónou způsobuje vibrace palivových souborů a také proutků, což může vést až k poškození palivových proutků (tj. prodření pokrytí a únik štěpných produktů do chladiva). I když palivo v reaktoru pracuje jen několik let a je pak skladováno v bazénech a následně suchých obalových souborech, je důležité monitorovat jeho stav a chování, neboť jeho stav pak může ovlivňovat další nakládání s palivem, např. zavezení do další kampaně či zavezení do suchých obalových souborů. Monitorování stavu paliva má také přímou souvislost se zajištěním jaderné bezpečnosti a radiační ochrany elektrárny.

Metody monitorování paliva na jaderných elektrárnách

Způsobů monitorování stavu paliva je několik a závisí na typu paliva, způsobu provozování reaktoru, chování paliva během provozu a požadavcích jaderného dozoru. Dalším důvodem k provádění inspekcí paliva je např. zavezení testovacích souborů, tzv. LTA (Lead Test Assembly) [2] nebo zavezení nového typu paliva do tzv. pilotního provozu [3]. V případě, že palivo pracuje dle očekávání a nevyskytují se netěsnosti, tedy úniky štěpných produktů z paliva do chladiva, či jiné anomálie, stačí provádět průběžný monitoring pro ověřování jeho stavu. To zahrnuje např. měření rozložení výkonu v reaktoru, měření doby pádu regulačních orgánů, měření třecích sil během pádu regulačních orgánů a měření aktivity chladiva primárního okruhu. Během vyvážení paliva z reaktoru je prováděn online sipping, který slouží k posouzení, zda je palivový soubor těsný.

Na některých jaderných elektrárnách jsou prováděny také pravidelné inspekce paliva s cílem průběžně sledovat jeho stav. Takový program je zaveden např. na elektrárně Temelín [4], dalšími elektrárnami jsou např. Jihoukrajinská (Ukrajina), Loviisa (Finsko), bloky v USA. Inspekce paliva jsou prováděny pomocí speciálních zařízení, tzv. inspekčních stendů, např. stendy pro palivo typu VVER-1000 používané na elektrárně Jihoukrajinská (obr. 1a) a Temelín (obr. 1b). Vzhled a vybavení stendu pak závisí na výrobci a typu paliva, pro který je určen. V základu tak inspekční stend umožňuje vizuální kontrolu palivového souboru a kontrolu geometrie (průhyb, zkrut a růst). To vše pomocí podvodního a radiačně odolného vybavení.



Obr. 1: a) Inspekční stend firmy Westinghouse na JE Jihoukrajinská [5]; b) inspekční stend na JE Temelín [6]

V případě, že se vyskytnou neočekávané stavy, je průběžný monitoring paliva doplňován o další způsoby, jak zjistit příčiny pozorovaného stavu a stanovit možná nápravná opatření. Inspekční stendy tak mohou být doplněny o možnost nalezení netěsného palivového proutku v konkrétním palivovém souboru, rozebrání palivového souboru a vyjmutí palivového proutku ze souboru, detailní vizuální kontrolu vyjmutého palivového proutku, změření tloušťky oxidické vrstvy na pokrytí palivového proutku, změření průměru palivového proutku a další. Možností je více, avšak záleží také na možnostech elektrárny, neboť ne každá metoda kontroly paliva je aplikovatelná v dané odstávce bloku. Některé specifické analýzy jsou prováděny až po dochlazení palivového souboru a jeho převozu do horkých komor [7].

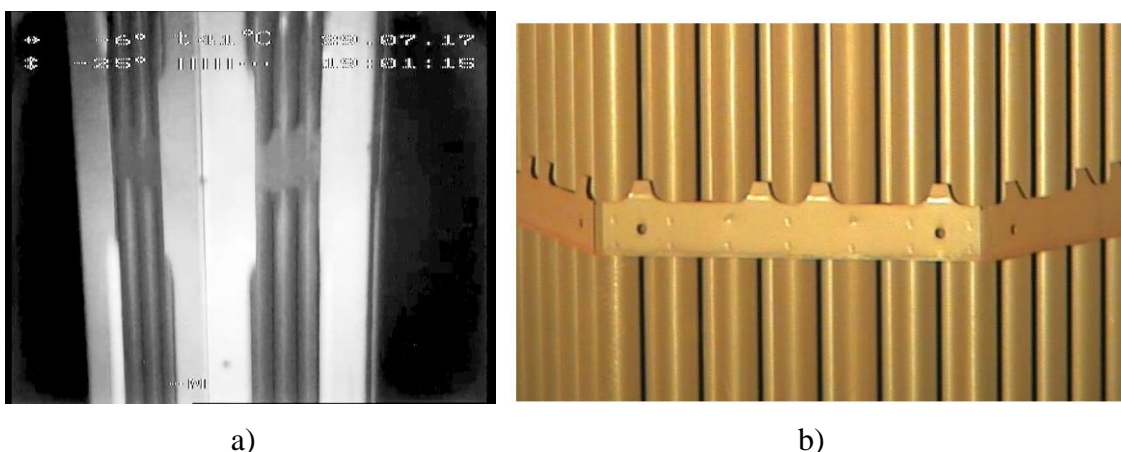
Vizuální kontrola palivových souborů

Vizuální kontrola zahrnuje kontrolu celkového vzhledu palivového souboru, viditelných periferních palivových proutků, distančních mřížek a dalších komponent souboru. Kontrolován je také korozní stav, případná přítomnost úsad, nečistot, cizích předmětů a jiných anomálií. Cílem základní vizuální kontroly je tedy zjistit, v jakém stavu se palivový soubor po (další) odpracované kampani nachází a zda jeho stav odpovídá očekávání. Pakliže je vizuální kontrola zaměřena na palivové soubory vykazující nějaké anomálie v chování (např. netěsnost, delší doba pádu klastru, potíže při vyvážení z aktivní zóny, nerovnoměrnost v rozložení výkonu atd.), je cílem vizuální kontroly zjistit příčinu anomálního chování (např. identifikovat netěsný proutek, najít poškození pokrytí netěsného proutku, najít úsady na pokrytí proutku, zjistit větší průhyb souboru či proutků, najít poškozené části souboru atd.). Korozní stav palivových proutků, distančních mřížek a dalších komponent souboru může být monitorován z důvodu zjišťování výskytu významných anomálií, které by bez změny výrobního procesu nebo chemického režimu chladiva vedly ke vzniku netěsností paliva.

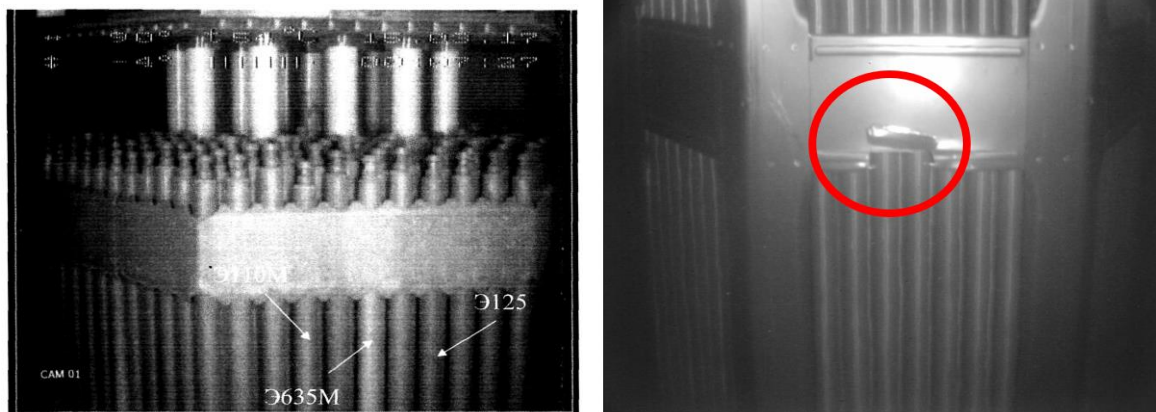
Včasné odhalení mechanického poškození na proutcích a dalších komponentách souborů může zamezit vzniku netěsnosti nebo vzniku cizích předmětů (např. odlomený kus distanční mřížky), které by mohly poškodit palivo či další části primárního okruhu. Bez povědomí o tom, zda je na palivovém souboru nějaké poškození a jaké, není možné navrhnout ani provést relevantní nápravná opatření.

Vizuální kontroly jsou prováděny pomocí podvodní radiačně odolné kamery. Obvykle jsou používány černobílé kamery, neboť obsahují součásti s vyšší radiační odolností, tj. neobsahují CCD prvky, které jsou na záření citlivější. Barevné kamery jsou také používány, ale většinou mají nižší radiační odolnost, za to pak větší zoom.

Vizuální kontrola je prováděna převážně u těch souborů, které mají viditelné proutky, tj. nemají obálku. Palivo typu VVER-1000 je bezobálkové, palivo typu VVER-440 je obojího typu, tedy s obálkou i bez obálky (viz obr. 2a). U paliva typu VVER-440 s obálkou je možné provést vizuální kontrolu až po demontáži obálky (viz obr. 2b), jak je prováděno na JE Loviisa ve Finsku [8, 9]. Na obr. 3 jsou znázorněny příklady kontrol paliva typu VVER-1000 na ruských blocích Balakovo a Kalinin, kde na Balakovské byl kontrolován palivový soubor s novými typy proutků [10] a na Kalininské bylo identifikováno poškození distanční mřížky z manipulací s palivem vedoucí k následné modifikaci designu paliva (použití mřížek s tzv. kremelskou stěnou) [11].



Obr. 2: a) Palivový soubor VVER-440 bez obálky [2]; b) kontrola paliva na elektrárně Loviisa – palivový soubor po demontáži obálky [9]



a)

b)

Obr. 3: a) Kontrola palivového souboru VVER-1000 na JE Balakovo s novými typy proutků [10]; kontrola palivového souboru VVER-1000 na JE Kalinin s identifikací poškození [11]

Výstupem vizuální kontroly paliva je jednak porovnání stavu s očekáváním a ověření, že je palivový soubor vhodný pro zavezení do další kampaně, ale také např. návrh nápravných opatření či dalších kroků pro zlepšení stavu paliva. Výstupy jsou důležité nejenom pro provozovatele elektrárny (např. zmírnění konzervatismu v provozu bloku, optimalizace chemického režimu, optimalizace manipulací s palivem či překládkových schémat), ale také pro výrobce paliva, který může na základě těchto kontrol provést např. úpravy v designu paliva [12].

Kontrola rozměrové stability palivových souborů

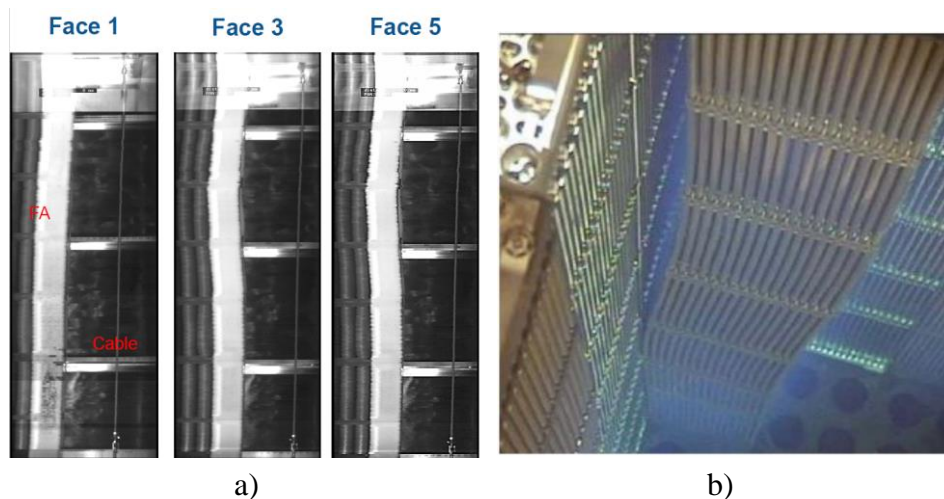
Průhyb a zkrut bývají monitorovány z důvodu sledování rezerv do poškození paliva během manipulací, dále pro sledování mezer mezi palivovými soubory v aktivní zóně během provozu, které mají vliv na průtok chladiva, a dále také mohou podpořit optimalizaci vsázek tam, kde je potřeba přistoupit ke snížení průhybů palivových souborů jejich umístěním do vybraných pozic v aktivní zóně.

Růst palivových souborů je monitorován např. pro optimalizaci polohy bloku ochranných trub reaktoru, který během provozu přitlačuje soubory shora a brání jim ve volném růstu směrem nahoru. To má pak vliv na jejich průhyb. Růst palivových proutků může být sledován z důvodu optimalizace neurčitosti uvažované při prověřování kritérií palivového proutku vstupujících do bezpečnostního hodnocení vsázek.

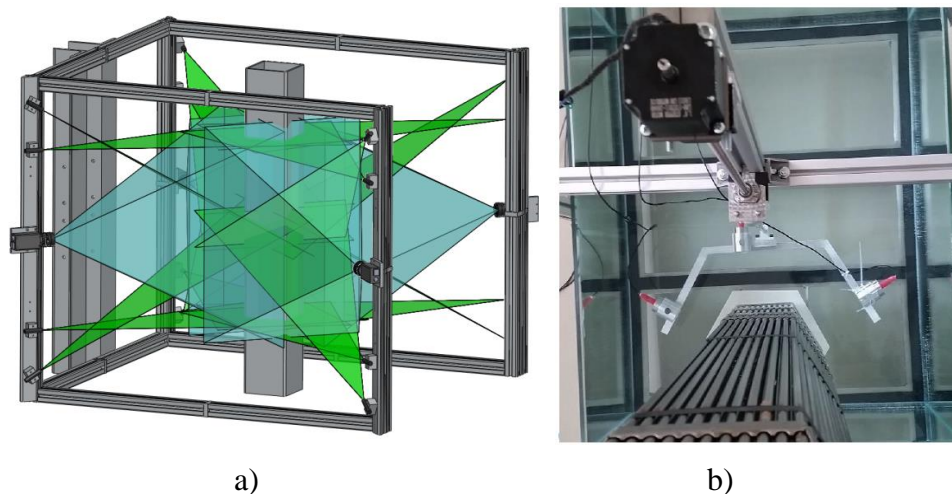
Kontrola rozměrové stability palivového souboru je prováděna během odstávky bloku v bazénu buď pomocí kamerového systému (viz obr. 4), nebo pomocí měřicích zařízení, např. na bázi ultrazvuku či laseru (viz obr. 5).

V obou případech měření geometrie je nutné provést správné vyhodnocení naměřených dat. Pokud je měření prováděno pomocí kamerového systému, vyhodnocení je pak prováděno z obrazu. V takovém případě je většinou poblíž palivového souboru umístěné buď pravítko, nebo jiný předmět sloužící jako referenční hodnota. Pokud je měření prováděno pomocí měřicích sond (ultrazvuk, laser), jsou pak zapotřebí SW nástroje pro vyhodnocení naměřených dat (např. ve formátu *.txt). Výsledkem jsou průhybové křivky, jak je zobrazeno v obr. 4.

Výsledkem měření rozměrů palivových souborů jsou tedy informace vstupující do analýz vsázek, neboť např. růst palivových souborů má vliv na jejich průhyb a směr a velikost průhybu palivových souborů má vliv na velikost mezer mezi soubory a na rozložení výkonu v aktivní zóně.



Obr. 4: Měření průhybu palivového souboru pomocí kamery: a) tři strany palivového souboru v obraze kamery [13]; b) kamerový záběr na prohnutý palivový soubor na JE Ringhals [14]



Obr. 5: a) Zařízení Newton Labs QUAD400UW pro kontrolu rozměrů palivového souboru [15]; b) měření geometrie makety souboru pomocí ultrazvuku v Centru výzkumu Řež [16]

Shrnutí

Předložený článek shrnuje základní způsoby kontrol jaderného paliva na jaderných elektrárnách, které jsou důležité jednak z důvodů sledování stavu paliva po odpracovaných kampaních v porovnání s očekávanými danými výrobcem paliva a provozní zkušeností, a jednak z důvodů zjištění příčin anomálního chování paliva a ke stanovení možných nápravných opatření pro další provoz.

Literatura

- [1] Heraltová, L.: *Jaderné reaktory a jak to vlastně vše funguje*. Prezentace, Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení v Praze.
- [2] Höglund, J., Riznychenko, O., Latorre, R., Lashevych, P. (2011): Performance of the Westinghouse WWER-1000 Fuel Design. *9th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Burgas (Bulgaria), pp. 196-202. ISSN 1313-4531
- [3] Simonov, A. N., Polyakova, Y., Marakulin, K. (2019): The Results of the Expanded Pilot Operation of Assemblies of Third Generation at Unit 4 of Kola NPP. *13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute

- for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 229-239. ISSN 1313-4531
- [4] Malá, M., Kopeć, M., Pašta, O., Matocha, V., Ernst, D., Dzurus, M. (2020): *Monitorování stavu paliva během životnosti jaderné elektrárny*. *Jaderná energie*, roč. 1 (66), č. 4, str. 66-68. ISSN 2336-4157
- [5] Önnby, C. (2015): Performance of the Westinghouse WWER-1000 fuel design. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [6] Malá, M. (2016): An Overview of the PIIP program on TVSA-T fuel at Temelín NPP. *International Conference VVER 2016 Power Uprates, Long Term Operation and New Builds*, ČNS, Praha, poster.
- [7] Lafchiev, K., Johnson, K., Jädernäs, D., Shevyakov, A., Ugryumov, A. (2019): PIE of Three TVEL Fuel Rods Irradiated in Ringhals 3, Sweden. *13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 341-352. ISSN 1313-4531
- [8] Peri, V. (2017): Recent Fuel Related Activities at the Loviisa Nuclear Power Plant, *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 71-76. ISSN 1313-4531
- [9] Lehtinen, I.-V. (2015): Poolside Inspections at Loviisa NPP. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [10] Vasilchenko, I. N. (2017): Objectives of further development of WWER reactor cores. *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 125-130. ISSN 1313-4531
- [11] Molchanov, V. (2017): Project “Zero Failure Level” Status, Problems, Tasks for Future. *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 405-414. ISSN 1313-4531
- [12] Ernst, R., Ernst, D., Milisdörfer, L. (2010): *Palivo Westinghouse – r. 2000 až 2010*. *Bezpečnost jaderné energie*, roč. 18, č. 11/12, str. 349-356. ISSN 1210-7085
- [13] Malá, M., Klouzal, J., Dostál, M. (2015): CVR / UJV Support to Fuel Inspections at Temelín NPP. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [14] Franzén, A. (2017): *Evaluation of Fuel Assembly Bow Penalty Peaking Factors for Ringhals 3 – Based on a Cycle Specific Core Water Gap Distribution*. Master Thesis, Uppsala Universitet, Uppsala (Sweden). ISSN 1650-8300
- [15] Newton Labs (2021): *Detecting Twisted and Bowed PWR and BWR Fuel Assemblies*, [online]. Available at: https://newtonlabs.com/nuke_QUAD400.htm
- [16] Kopeć, M., Malá, M., Klouzal, J. (2018): Ultrasonic System for Nuclear Fuel Geometrical Changes Evaluation. *TOPFUEL 2018 Reactor Fuel Performance*, Praha, poster.

AKTIVITY SKUPINY ČEZ V OBLASTI BEZPEČNOSTI A SPOLEHLIVOSTI JADERNÉHO PALIVA

ČEZ GROUP ACTIVITIES IN THE FIELD OF NUCLEAR FUEL SAFETY AND RELIABILITY

Jan Klouzal, Vítězslav Matocha a Martin Dostál

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Výzkumu spolehlivosti a životnosti jaderného paliva se skupina ČEZ věnuje dlouhodobě, zejména zapojením do mezinárodních projektů. V článku jsou popsány nejzásadnější výsledky programů Halden Reactor Project a Studsvik Cladding Integrity Project, navazující vývoj programových prostředků pro hodnocení stavu jaderného paliva v ÚJV Řež, a. s. a budoucnost OECD projektů zahrnující i nový experimentální program v reaktoru LVR-15 společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstract

Research of the nuclear fuel reliability and extended life cycle is a long-term goal of the ČEZ Group, achieved namely by the participation in the international programmes. The paper describes main outcomes of the OECD Halden Reactor Project and Studsvik Cladding Integrity project, associated development of computational models at UJV and the future of the OECD projects including experiments in LVR-15 reactor of Research Centre Řež.

Životnost jaderného paliva

Jaderné palivo představuje z hlediska primárního okruhu tlakovodního reaktoru nejčastěji vyměňovanou komponentu. Doba, po kterou je palivo v reaktoru, je omezena z jedné strany obohacením štěpným materiálem (se současným limitem 5 % U-235 je to v lehkovodních reaktorech 5 – 6 let), z druhé strany chováním použitých materiálů. Při otevřeném palivovém cyklu (vyhořelé palivo je ukládáno bez přepracování) je ekonomicky výhodné maximalizovat dobu, po kterou může palivo v reaktoru pracovat i za cenu vyšších nákladů na obohacení. Materiálové hledisko je ale významné z pohledu bezpečnosti a spolehlivosti provozu, protože pokrytí paliva musí plnit funkci hermetické bariery proti úniku radioaktivních látek. Prodloužení životnosti paliva proto musí být podloženo odpovídajícím experimentálním programem a vývojem výpočetních modelů. Tyto experimenty vyžadují transport vyhořelého paliva z elektráren do horkých komor anebo ozařování instrumentovaných palivových proutků ve výzkumných reaktorech. Proto jsou natolik nákladné, že jedinou cestou, jak pro podporu českých jaderných elektráren (JE) získat komplexní data, je účast v mezinárodních výzkumných projektech. Tu pro ČEZ, a. s. zajišťuje ÚJV Řež, a. s. (ÚJV) a zároveň poskytuje vyhodnocení získaných výsledků a zodpovídá za jejich využití v praxi.

Design a provozní podmínky jaderného paliva

V současných lehkovodních reaktorech se prakticky výlučně využívá palivo ve formě válcových tablet lisovaného a spečeného UO_2 uložených v povlakové trubce ze Zr slitiny. Takto tvořené proutky jsou vázány soustavou distančních mřížek do formy palivového souboru.

Výška tablety je typicky 10–12 mm, vnější průměr cca 8 mm. Výhodou UO_2 je vysoká odolnost vůči oxidaci ve vodě i v páře, i v případě poškození pokrytí tak zůstává většina radioaktivních látek v matici paliva. Nevýhodou je nízká tepelná vodivost (po ozáření cca $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a nízká hustota ve srovnání s kovovým uranem nebo UN či UC. Palivová tableta má tak teplotu vnějšího povrchu 350–400 °C, v centru za normálního provozu až 1400 °C. Velký gradient teploty vede k rozpadu tablet na několik fragmentů. Ačkoliv jsou palivové tablety při výrobě spékány v redukční atmosféře při cca 1700 °C na 95–96 % teoretické hustoty, vedou radiací

urychlené difúzní procesy v UO_2 z počátku ozařování v reaktoru k dalšímu dospečení a poklesu objemu paliva o 1 % až 1,5 %. Moderní paliva s aditivami urychlujícími spékání (Cr, Al, Si) už vykazují jen zanedbatelné dospečení v reaktoru. Po ukončení densifikace dochází k nárůstu objemu paliva v důsledku akumulace radiačních defektů a pevných i plyných produktů štěpení. Rychlost napuchání je cca 0,75 % na 10 MWd/kgU. Část plyných a těkavých produktů štěpení uniká z matice paliva – dominantním procesem je difúze, proto množství unikajících atomů závisí na teplotě. Roli hraje i mikrostruktura paliva, zejména efektivní vzdálenost, kterou musí atom urazit, aby se difúzí dostal k volnému povrchu tablety. Významnými prvky z hlediska radiačních následků jsou radioaktivní izotopy jódu, cesia, xenonu a kryptonu, stabilní izotopy vzácných plynů přispívají k nárůstu tlaku pod pokrytím palivového proutku. Zvyšování vyhoření (životnosti) paliva tak musí řešit zejména narůstající napuchání paliva, akumulaci produktů štěpení a radiačních defektů vedoucí k významným změnám mikrostruktury a narůstající uvolňování štěpných produktů.

Povlaková trubka má u nejpoužívanějších typů paliva tloušťku cca 0,58 – 0,70 mm. Ve varných reaktorech se stále používá původní slitina Zircaloy-2 (Zr-1,5%Sn-0,15%-Fe-0,1%Cr-0,05%Ni), v tlakovodních reaktorech nyní dominují Nb obsahující sliny M5TM a E110 (obojí Zr-1%Nb + příměsi O a Fe) a Optimized ZirloTM obsahují proti předchozím dvěma slitinám i 0,7%Sn. Stejně materiály jsou používány i pro nosné konstrukční části palivových souborů, které se nachází v aktivní zóně – vodící trubky anebo obálky palivových souborů. Neustále probíhající vývoj těchto slitin je jednoznačně motivován snahou umožnit delší a spolehlivější provoz paliva omezením koroze, radiačního růstu a radiačního i tepelného creepu.

Z výše uvedeného je zřejmé, že jak v oblasti paliva, tak v oblasti pokrytí je průběžný vývoj ekonomicky přínosný. Nasazení nových technologií ale není možné bez předchozího experimentálního zhodnocení jejich dopadu na bezpečnost a spolehlivost provozu paliva. Vzhledem ke komplexnosti chování jaderného paliva je běžné, že některé jevy se projeví až po delším používání daného typu paliva. I v tomto případě hrají experimentální programy neocenitelnou roli při zjištění příčin a nalezení nápravných opatření.

OECD Halden Reactor Project (HRP)

Tento projekt pod záštitou OECD NEA je nejdéle běžícím mezinárodním projektem tohoto typu. Jeho základem bylo využití reaktoru v norském Haldenu (HBWR) k výzkumu chování palivových elementů. Haldenský reaktor byl těžkou vodou chlazený a moderovaný varný reaktor. Byl koncepčně připravený v roce 1955 jako demonstrační jednotka tohoto typu reaktorů s výkonem 10MWt využívající palivo z přírodního uranu, bez uvažování výroby elektřiny, ale sloužící jako zdroj páry pro sousední papírnu. V roce 1958 byl zahájen mezinárodní Halden Reactor Project a v roce 1959 byl reaktor spuštěn. Cena reaktoru byla 3,7 milionů USD, z toho 2 miliony stála těžká voda a první vsázka paliva ([1]). Po ukončení základních fyzikálních experimentů byla palivo vyměněno za obohacené, výkon reaktoru byl zvýšen na 20 MWt a do popředí zájmu se dostaly experimenty, při kterých byly v reaktoru ozařovány instrumentované palivové elementy různých typů. Instrumentace umožňovala měření teploty pokrytí i paliva, tlaku plynu v proutku, rozměrových změn paliva i pokrytí, uvolnění radioaktivních látek i dalších jevů. Experimenty byly prováděny jak v podmínkách HBWR (3,25 MPa, 230 °C), tak ve smyčkách s tlakovými, teplotními a chemickými podmínkami jiných typů reaktorů. Testovány byly jak palivové elementy zavezené do HBWR v čerstvém stavu, tak refabrikované elementy získané z energetických reaktorů – tak mohlo být prováděn výzkum zaměřený například na prodloužení životnosti nebo zjištění limitů selhání stávajícího paliva. Haldenský reaktor byl odstaven v roce 2018, HRP je nyní uzavíráno vyhodnocením posledních experimentů.

UJV přistoupilo k projektu v roce 1993 jako první ze zemí východního bloku. Výsledky z HRP byly využívány v různých projektech, ovšem hlavním a posléze výlučným koncovým

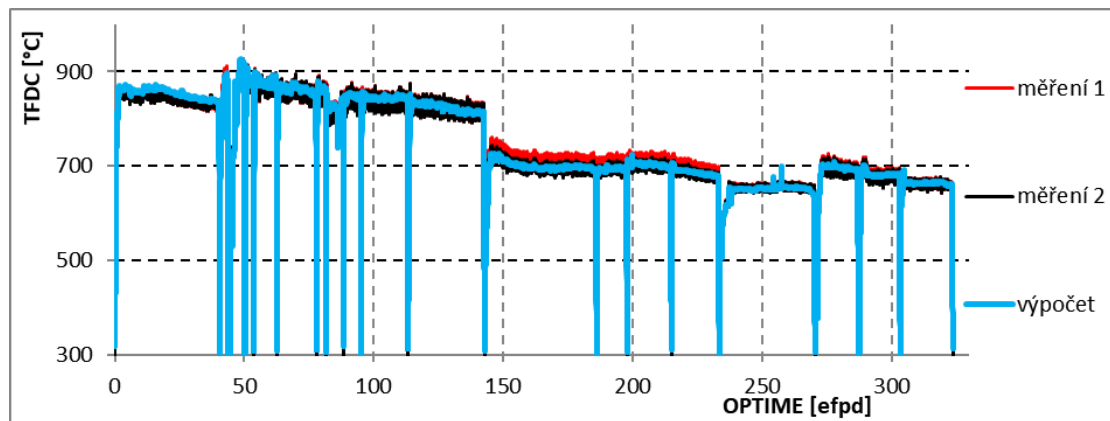
uživatelé i sponzorem členství v projektu byl ČEZ, a. s. Díky členství v projektu je pro skupinu ČEZ dostupná celá databáze výsledků projektu od roku 1958 do současnosti.

Jen v posledních deseti letech byla v rámci HRP provedena široká škála experimentů zaměřených na zvyšování „životnosti“ jaderného paliva, viz tab. 1. Díky účasti hlavních výrobců jaderného paliva i největších provozovatelů JE byly experimenty prováděny pro všechny relevantní typy paliva. Data jsou v ÚJV analyzována a využívána buď přímo (hodnocení nových typů paliva) nebo k tvorbě a validaci modelů používaných pro hodnocení paliva JE Temelín a JE Dukovany.

Tab. 1: Přehled hlavních výstupů HRP v posledních deseti letech

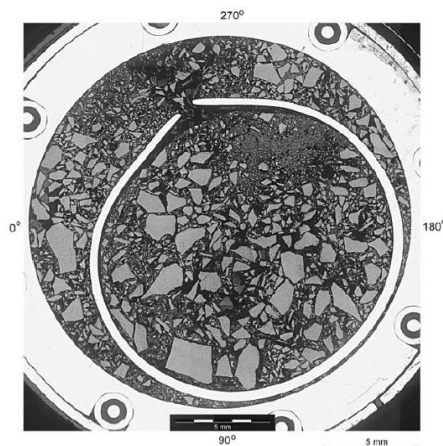
Označení experimentů	Popis a cíle experimentů	Aplikace
„FGR Threshold“ IFA-629/700/729	Postupné zvyšování výkonu paliva s měřením teploty a tlaku v proutku, vyhledání teplotního prahu pro uvolnění plynných produktů štěpení v závislosti na typu paliva a jeho vyhoření.	Srovnání různých variant paliva v podmínkách nad rámec provozovaných vsázek. Tvorba výpočetních modelů
„Lift-off“ IFA-610	Dlouhodobý provoz proutků s přetlakem plynu pod pokrytím proti chladivu	Stanovení limitů spolehlivého provozu pro provoz na zvýšeném výkonu nebo zvýšeném vyhoření paliva
„Gas-flow“ IFA-655	Ozařování proutků připojených na plynovou smyčku, průběžná analýza uvolnění radioaktivních látek z paliva.	Stanovení tzv. „gap inventory“ pro výpočet radiačních následků postulovaných havárií, srovnání různých typů paliva
Integrální experimenty IFA-633, 676,	Dlouhodobé (až 10 let) ozařování	Kvalifikace nových typů paliva v celém rozsahu vyhoření
Korozní experimenty IFA-708...	Expozice široké matice vzorků povlakových slitin v podmínkách agresivních chemických režimů (vysoký výkon, vysoký obsah Li)	Kvalifikace nových typů povlakových slitin pro podmínky nutné pro prodloužování kampaní
Creep pokrytí	Ozařování proutků s možností regulace vnitřního tlaku a on-line měřením změny průměru proutku	Kvalifikace nových typů povlakových slitin
LOCA IFA-650	Simulace havárie se ztrátou chladiwa pro vysoce vyhořelé palivo vyvezené z energetických reaktorů	Prověření platnosti bezpečnostních kritérií paliva pro zvýšené vyhoření

Nejčastější skupinou byly experimenty zaměřené na integrální chování palivového elementu v podmínkách, kdy buď jeho vyhoření, nebo jeho výkon překračovaly v provozu dosahované hodnoty. Jedním z posledních experimentů byl IFA-789, ve kterém byly ozařovány dva segmenty z proutků vyvezených z JE Loviisa (VVER-440) s vyhořením 55 MWd/kgU. Cílem experimentu bylo zvýšit vyhoření těchto proutků nad aktuální limit (64 MWd/kgU), přitom bylo on-line prováděno měření teploty v centru paliva, tlaku v proutku a změny délky proutku [3]. Na obr. 1 jsou vyneseny změřené hodnoty spolu s predikcemi kódem TRANSURANUS provedenými v ÚJV. Z grafů je patrná výborná shoda v teplotě paliva (střední hodnota rozdílu měření-predikce je -3,5 °C, střední kvadratická odchylka 8,5 °C). Tyto výsledky potvrzují, že v režimu normálního provozu se palivo chová spolehlivě i pro vyhoření nad současným limitem a hlavně, že toto chování je predikovatelné v ÚJV dostupnými výpočetními nástroji.



Obr. 1: Výsledky měření teploty v centru paliva při ozařování v experimentu IFA-789 mezi 55 a 69 MWd/kgU ve srovnání s predikcí modelem v kódu TRANSURANUS

Některé skupiny experimentů ale ukázaly, kde leží limity současného paliva. Při testech simulujících havárie se ztrátou chladiva (LOCA) se ukázalo, že po překročení vyhoření cca 60 MWd/kgU dochází u některých proutků k rozpadu palivových tablet na drobné fragmenty (s rozměrem pod 1 mm). Po překročení 70 MWd/kgU docházelo v některých testech k rozpadu celé tablety (viz řez experimentálním kanálem obsahujícím porušený proutek a vysypané fragmenty paliva na obr. 2). Vyhoření paliva ale nebylo jediným faktorem, který by určoval, zda dojde k fragmentaci paliva. Na haldenské LOCA experimenty navázaly testy v rámci OECD projektu SCIP.



Obr. 2: Řez experimentálním kanálem obsahující porušený proutek v LOCA testu IFA-640.4, fragmenty palivové tablety jsou vysypané i vně proutek [2]

OECD Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP)

Tento mezinárodní projekt byl pod záštitou OECD zahájen jako pětiletý v roce 2004 a jeho základem bylo využití testovacího reaktoru R2 ve Studsviku. V tom bylo mezi lety 1969 a 2005 provedeno přes 1000 tzv. ramp testů, tj. experimentů simulující rychlé zvýšení výkonu paliva odpovídající nájezdu energetického reaktoru na výkon nebo přechodovým procesům abnormálního provozu, byly financované zejména výrobci paliva a pomohly ve vývoji v současnosti používaných slitin pokrytí.

Cílem projektu SCIP [3], jehož se ÚJV účastní od jeho počátku, bylo studium základních mechanismů selhání pokrytí palivového proutku vysokého vyhoření způsobených mechanickou interakcí palivo-pokrytí (PCI). Mechanická interakce palivo-pokrytí byla studována v ramp testech se vzorky proutků, které byly předozářeny v energetických reaktorech. Klíčové parametry

důležité pro vodíkem indukovaná selhání Zr slitin, jako je zpožděné hydridické praskání a hydridické zkrěhnutí pokrytí, jsou díky projektu SCIP nyní mnohem lépe objasněny a mohly být v mnoha případech kvantifikovány a popsány výpočetními modely.

Úspěch projektu vedl k pětiletému pokračování SCIP-II zaměřeného na dopad použití pokročilých materiálů paliva na riziko selhání pokrytí v důsledku PCI. Experimenty byly opět zaměřené na korozní praskání pokrytí pod napětím (aktivním prvkem je jód uvolňovaný z paliva) a vodíkem indukovaná poškození.

Třetí pětileté pokračování (SCIP-III) bylo v odezvě na výsledky nákladných vnitroreaktorových experimentů prováděných v Haldenu rozšířeno o studium chování paliva při havárii se ztrátou chladiva (LOCA) pomocí flexibilnějších mimo-reaktorových testů. Ty umožnily otestovat širokou škálu vzorků za různých podmínek. Cenným výstupem těchto zkoušek je potvrzení, že k fragmentaci paliva pozorované dříve v HRP nedochází, pokud nedojde k značné deformaci pokrytí. To otevřelo cestu k možnému zvýšení vyhoření paliva.

V současnosti (od roku 2019) tedy běží již čtvrtá pětiletá fáze (SCIP-IV), kde pokračuje výzkum chování paliva při LOCA a přibýlo studium chování paliva pro podporu zadní části palivového cyklu, kde je zejména studován stav palivových proutků (různého vyhoření a stavu, včetně netěsných) během jejich dlouhodobého skladování.

Během více než patnácti let byly experimentálně testovány ozářené vzorky většiny slitin používaných v LWR reaktorech (Zry-2, Zry-4, Zirlo™ a M5™, E110). Získaná data byla a jsou v ÚJV analyzována a využívána buď přímo (hodnocení nových typů paliva) nebo k tvorbě a validaci modelů používaných pro hodnocení paliva JE Temelín a JE Dukovany.

OECD Cabri International Programme (CIP)

Oproti předchozím je tento mezinárodní program zaměřený výlučně na chování paliva v mezních projektových haváriích s vnosem reaktivity (vystřelení, resp. pád regulačního orgánu z AZ a přechod reaktoru na kritičnost na okamžitých neutronech). Tyto postulované havárie jsou charakteristické rychlým a krátkým vnosem značné energie do paliva – stovky J/g UO₂ během desítek milisekund. Dochází tak k téměř adiabatickému ohřevu palivové tablety, která mechanicky namáhá pokrytí. Limitním faktorem určujícím, zda si pokrytí zachová celistvost je v této fázi havárie jeho korozní stav (pro danou hodnotu energie deponované v palivu) a proto tyto havárie stanovují omezení na životnost paliva.

Jedním z mála reaktorů umožňujících simulovat tyto události je CABRI ve Francii. Mezinárodní program zde byl zahájen v roce 2002 pod vedením IRSN a ÚJV se pro ČEZ, a. s. účastní programu od jeho zahájení. CIP má dva hlavní cíle:

- Stanovit bezpečnostní limit pro moderní typy tlakovodních slitin tlakovodních reaktorů (Opt. Zirlo™, M5™), které se vyznačují vyšší korozní odolností než původní Zircaloy-4.
- Prozkoumat odezvu paliva i v druhé fázi havárie, ve které dochází ke krizi přestupu tepla do chladiva primárního okruhu a přehřátí pokrytí. Tento cíl vyžadoval, aby byla původní sodíková smyčka nahrazena tlakovodní smyčkou.

Technické problémy při implementaci tlakovodní smyčky a následná dlouhá odstávka CABRI po havárii na JE Fukušima pro jeho zodolnění vedly k přerušení programu až do roku 2018, kdy byl realizován první test v tlakovodní smyčce.

Electric Power Research Institute (EPRI)

Díky členství ČEZ, a. s. v EPRI má ÚJV přístup i do programů „Fuel Reliability“ a „High Level Waste“. Knihovna „Fuel Reliability“ obsahuje mimo návodů a doporučení i množství podrobných výsledků nedestruktivních i destruktivních zkoušek palivových proutků i celých palivových souborů. Významné jsou zejména ty, které se zaměřují na kvalifikaci pokročilých

typů paliva (palivové tablety s aditivou, Opt. Zirlo™ a M5™). Na rozdíl od ozařování ve výzkumných reaktorech poskytují tyto výsledky potřebnou statistiku a ukazují chování paliva vyráběného v průmyslovém měřítku. Některé procesy, jako uvolnění plynných produktů štěpení nebo příspěvek mechanické interakce palivo-pokrytí jsou stochastické a na základě jednoho, sebe lépe navrženého a instrumentovaného experimentu není možné postavit spolehlivý výpočetní model nebo zhodnotit dopad odchylek v rámci tolerancí výrobního procesu. Díky členství v EPRI budou skupině ČEZ dostupné i výsledky z ozařování „Lead Test Assemblies“ s „ATF“ (původně „Accident Tolerant Fuel“, dnes „Advanced Technology Fuel“) – proutky s tenkou vrstvou chromu nanesenou na vnější povrch pokrytí jako ochrana proti oxidaci za normálního provozu i za havarijních podmínek.

V oblasti „High Level Waste“ jsou dostupná data z experimentálních programů zaměřených na spolehlivost a bezpečnost vyhořelého jaderného paliva při skladování a transportu. Jedná se zejména dlouhodobý creep při suchém skladování, vliv absorbovaného vodíku na mechanické vlastnosti Zr slitin a rychlost a míru odžihání radiačního poškození Zr slitin.

OECD Framework for Irradiation Experiments (FIDES)

Po uzavření haldenského reaktoru vyvstala otázka, jak ho nahradit nejen jako zdroj ozařovacích kapacit ale i jako místo centra mezinárodní spolupráce. Po několika workshopech OECD NEA vznikl framework FIDES. Od ostatních OECD projektů se liší tím, že nemá pevného poskytovatele služeb („operating agent“). Governing board FIDES bude vybírat, které aktivity budou ze společného rozpočtu placeny z nabídky více organizací uvnitř FIDES, přičemž se bude snažit vybalancovat podporované aktivity tak, aby pokryly všechny potřeby. První tříleté období FIDES bylo zahájeno v roce 2021. ČEZ a. s. je zastupován skupinou ÚJV. Běžící programy pokrývají problematiku kvalifikace nových materiálů pokrytí paliva v podmínkách normálního provozu („INCA“), bezpečnosti přechodových procesů spojených s load-follow režimem JE („P2M“) a mezních projektových havárií se ztrátou chladiva („LOCA-MIR“) a vnosem reaktivity – RIA v reaktoru TREAT („HERA“).

Program INCA je zaměřený na zhodnocení dopadu nanesení ochranných Cr a CrN vrstev na stávající povlakové slitiny na jejich mechanické chování v reaktoru, zejména na rychlost radiačně indukovaného creepu. Hlavní částí projektu je ozařování natlakovaných vzorků několika variant povlakových trubek v reaktoru LVR-15 společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Závěr

Uvedený přehled ukazuje, jaká pozornost je věnována zajištění experimentální podpory spolehlivého provozu paliva jaderných elektráren ČEZ, a. s. Výčet i přes svůj rozsah není vyčerpávající – nezahrnuje neaktivní experimenty (zmínit je nutné zejména dlouhodobý soubor ko-rozních a LOCA experimentů v ÚJP Praha) a ozařování materiálů vzorků na JE Temelín. Přesto je z něj patrné, že hodnocení vlastností nových typů, zvyšování flexibility provozu a prodloužování životnosti jaderného paliva vyžaduje komplexní kombinace mnoha typů experimentů a vývoje odpovídajících výpočetních modelů.

- [1] Hidle, H., Dahl, O. J (1959): *The Halden Boiling Water Reactor*. Halden Project Report, HRP-002, OECD Halden Reactor Project, Halden (Norway).
- [2] Oberländer, B. C., Jenssen, H. K., Espeland, M. (2008):. PIE results from the high burnup (83MWd/kg) PWR segment after LOCA testing in IFA 650-5. *Proceedings of the EHPG Meeting*, Sandefjord (Norway).
- [3] NEA OECD (2012): *The OECD NEA Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP) Executive summary*. OECD publications, NEA/CSNI/R(2011)10, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations.

HODNOCENÍ INTEGRITY TNR V PŘÍPADĚ APLIKACE STRATEGIE IVMR V RÁMCI PROJEKTŮ OECD/NEA A IAEA CRP

THE RPV INTEGRITY ASSESSMENT FOR THE IVMR STRATEGY, STATUS OF WORK DURING CONTINUING OECD/NEA AND IAEA/CRP PROJECTS

Jiří Žďárek, Jan Wandrol, Vladislav Pištora, Petr Gál, Vladimír Krhounek a David Batěk

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Hodnocení integrity TNR v případě strategie IVMR je jedním z nejdůležitějších výsledků, zda tlaková nádoba reaktoru vydrží velmi silné zeslabení tloušťky stěny vlivem odtavení v bazénu Coria. S ohledem na závažnost tohoto hodnocení byl schválen projekt OECD/NEA v rámci spolupráce WGIAGE a WGAMA. Paralelně s tímto projektem byl schválen projekt IAEA CRP (Coordination Research Project) určit PIRT (Phenomena Identification Ranking Table), Validační matici a Benchmark s podpořením strategie IVMR (In Vessel Melt Retention). ÚJV se aktivně účastní obou projektů s funkcí koordinátora. Oba projekty budou dokončeny až v roce 2024. Základní cíle obou projektů budou shrnuty, včetně účasti ÚJV.

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 another 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 WGAMA-WGIAGE was approved and started. Also was approved the IAEA CRP (Coordination Research Project) to determine the PIRT (Phenomena Identification Ranking Table), Validation matrix and Benchmark to confirm the IVMR strategy. ÚJV actively participate in both projects. Both projects will be finished in 2024. Principal targets and present status of both projects 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.

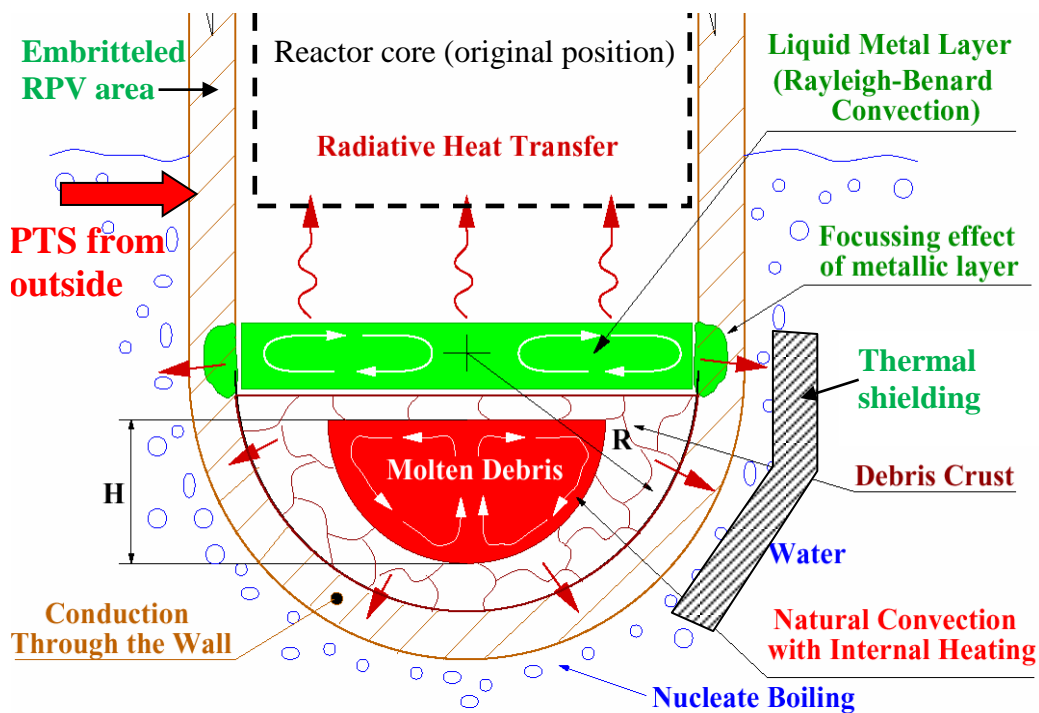
V našem příspěvku na začátku shrnujeme materiálovou problematiku a hodnocení pomocí MKP, včetně určení nejdůležitějších cílů. Všechny uvedené cíle jsou rovněž součástí probíhajícího projektu TAČR. Prakticky se shodnými cíli byl definován projekt OECD/NEA jehož status je uveden v závěru a kde se ÚJV aktivně podílí, včetně spolupráce na projektu IAEA CRP PIRT jehož status je rovněž stručně uveden v závěru.

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 [2] a [3].
- Významný vliv creepu (tečení materiálu) na části dna TNR.
- Malé zatížení vnitřním tlakem.
- Zatížení hmotností taveniny a vlastní vahou TNR.



Obr. 1: Dno TNR během SA a ukázka nedůležitějších efektů

V případě IVMR by TNR měla být posouzena z následujících hledisek:

1. V případě ablace stěny TNR by měla zbylá tenká vrstva stěny TNR vydržet zatížení hmotností Coria a vlastní vahou, plus malé zatížení vnitřním tlakem.
2. 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).
3. 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 chladiwa 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 [1]. 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 tažnost 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

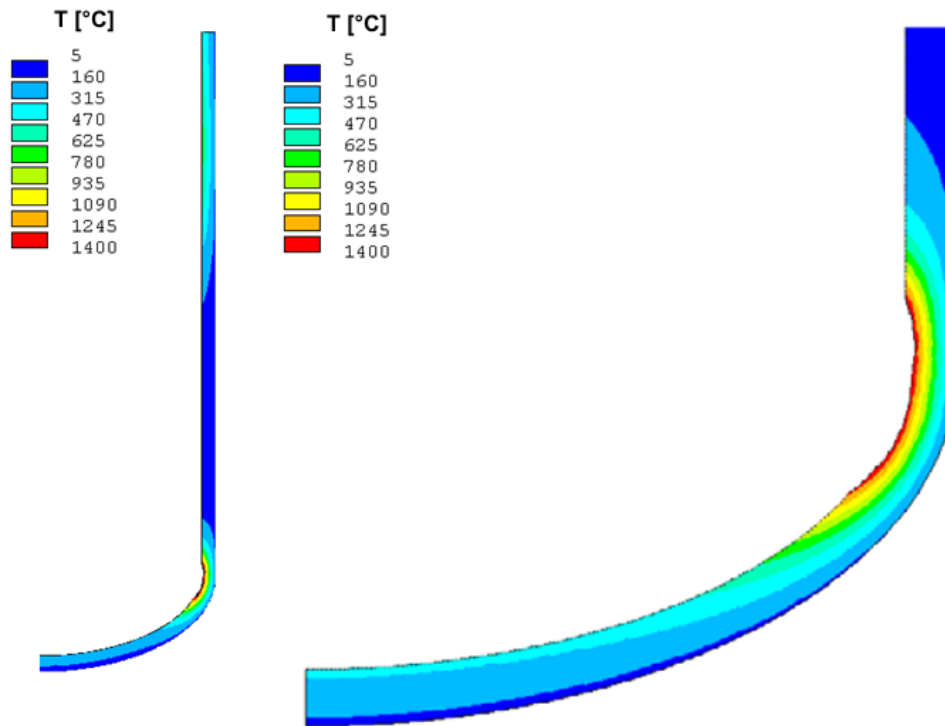
Z řešení je potřeba stanovit rozložení teplot a napětí ve stěně TNR. Vystává otázka, jakým způsobem hodnotit napjatost a stanovit dovolené napětí. Z důvodu velkého teplotního gradientu ve stěně TNR je velký rozptyl materiálových vlastností.

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.

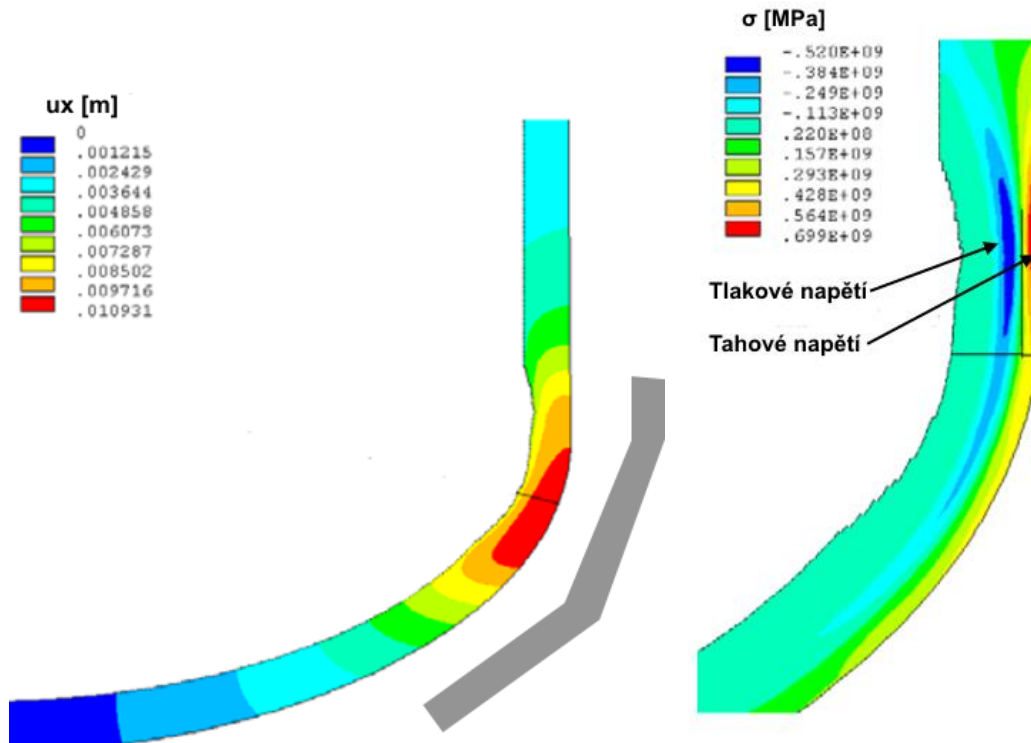
Dalším bodem výpočtového hodnocení je stanovení minimální tloušťky stěny TNR (ablation effect) a vyhodnocení její únosnosti.

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 effect) a také creepovým chováním materiálu. Na vnějším povrchu je napjatost tahová, zatímco uprostřed stěny TNR je napjatost opačné orientace, tedy tlaková.

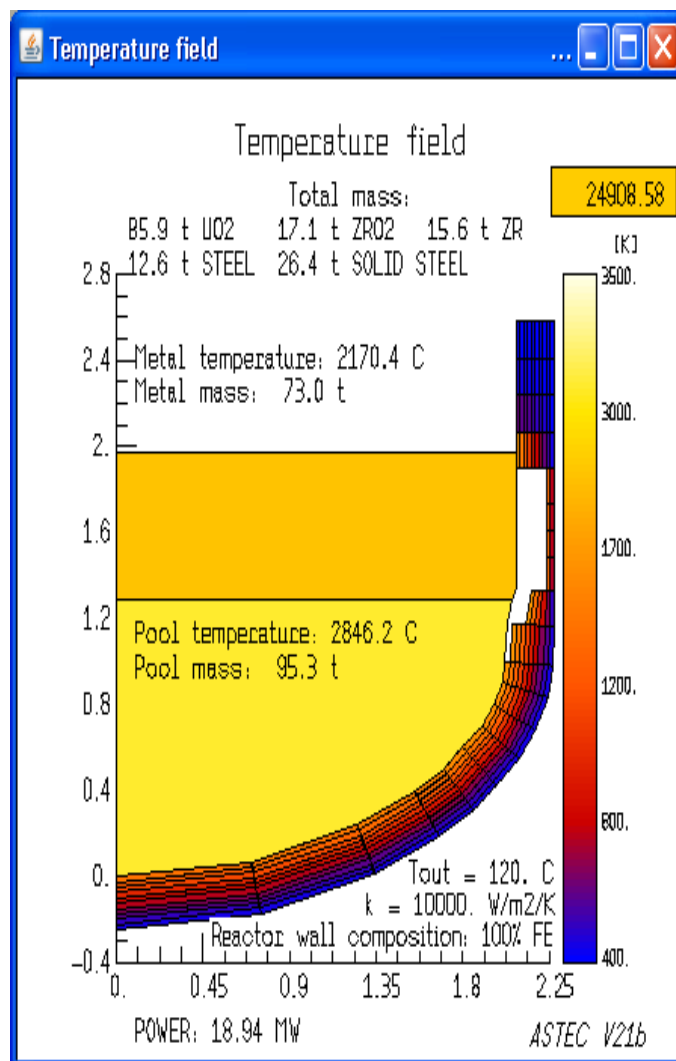
Na obr. 4 je uvedeno rozložení teplot ve dnu nádoby při SA v reaktoru *VVER 1000*. Jde o rozložení při dvouvrstvé konfiguraci bazénu. Hmotnost bazénu Coria je 95 t a jeho teplota je cca 2250 °C po 7 hodinách. Je patrné, že v místě horní vrstvy došlo k odtavení stěny nádoby a zůstala pouze tenká vrstva 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 (dvouvrstvého) a ve dnu nádoby TNR se zohledněním ablace stěny [5]

Současný stav projektu OECD/NEA a IAEA CRP

Oba projekty byly zahájeny na začátku roku 2021. Projekt OECD/NEA „Status Report on RPV Integrity“ byl rozdělen na tři sekce. Sekce č. 1 „Materiálová databáze“, Sekce č. 2 „Hodnocení Integrity“ a Sekce č. 3 „Kritéria a Metodologie hodnocení“. Každá sekce má dva klíčové vedoucí. Pro rok 2021 je stanoven cíl vypracovat „Draft Status Report“ k problematice každé sekce. V roce 2022 budou provedeny Review dílčích Status Reportů a následně v roce 2023 bude zpracován Final Status Report. Pro efektivní přípravu dokumentace byly již uskutečněny dvě video konference vedoucích projektů a jedna video konference se všemi účastníky zainteresovaných zemí. První drafty Status Reportů ze všech sekcí budou projednány na video konferenci se všemi účastníky projektu na konci září 2021.

Projekt IAEA CRP PIRT měl zatím jednu společnou videokonferenci všech účastníků zainteresovaných zemí. Další videokonference všech účastníků je plánována na konci října 2021.

Vedení obou projektů OECD a IAEA mělo jednu společnou videokonferenci v polovině roku a další videokonference je plánována na konec 2021. Je velmi důležité, že oba projekty budou navzájem spolupracovat a sdílet získané výsledky.

Literatura

- [1] Markov, S.I., Durinin, V.A., Mokhov, V.A. (2013): *Steel grades 15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA-A Class 1 for reactor VVER-TOI*, [online]. Available at: http://steelcast.ru/steel_for_atomic_reactors
- [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 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
- [3] 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
- [4] Nicolas, L., Durin, M., Koundy, V., Mathet, E., Bucalossi, A., Eisert, P., Humphries, L., Smith, J., Sievers, J., Smith, J., Pistora, V., Ikonen, K. (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.

APLIKACE PŘENOSNÝCH DEFEKTOSKOPŮ PRO DIAGNOSTIKU V ENERGETICE

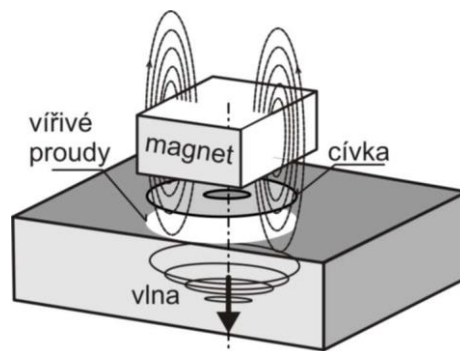
Stanislav Štarman

Metoda bez akustické vazby mezi sondou a materiálem EMAT

V případech, kdy nelze použít kontaktní měření je nutné využít vhodné metody bezkontaktního testování struktury materiálů. Jednou z těchto metod, které také slouží pro detekci a lokalizaci podpovrchových vad, využívá elektromagnetická-akustická sonda EMAT. Oproti standardním bezkontaktním metodám metoda s EMAT sondou pracuje bez akustické vazby mezi sondou a materiálem. Jelikož pro vznik ultrazvukových vln musí z principu EMAT v testovaném prostředí protékat vířivé proudy, je EMAT ultrazvuková defektoskopie použitelná pouze pro elektricky vodivé materiály.

Princip EMAT sondy

EMAT sonda se skládá z vodiče nebo plošné cívky (případně více cívek) a permanentního magnetu (případně více magnetů) umístěného nad testovaným objektem (obr. 1). V některých případech lze místo permanentního magnetu použít elektromagnet.



Obr. 1: Uspořádání EMAT sondy

Střídavý proud I procházející vhodně navrženou cívkou, která je orientována kolmo k povrchu vodivého materiálu, vyvolá střídavé magnetické pole, které je zastoupeno vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Střídavé magnetické pole indukuje ve vodivém materiálu vířivé proudy, které vytvářejí střídavý magnetický tok, který má opačný směr proti počátečnímu proudu protékajícímu cívkou. Hloubka vniku elektromagnetického pole daná frekvencí proudu a parametry materiálu musí být menší než vlnová délka λ ultrazvukové vlny. Výsledkem interakce vířivých proudů a stacionárního magnetického pole permanentního magnetu je tzv. Lorenzova síla \mathbf{F} . Tato síla způsobí deformaci vodivého materiálu, jejímž důsledkem je akustická vlna šířící se požadovaným směrem v testovaném materiálu. Ultrazvukové vlny [1], které se dále šíří materiálem, se odrážejí od struktury testovaného materiálu. Odražené ultrazvukové vlny způsobují změnu kmitání krystalické mřížky, což se projeví změnou velikosti detekovaného elektrického pole v EMAT sondě. Ultrazvukové vlny jsou tedy transformovány na elektrický ultrazvukový signál. Odražené ultrazvukové vlny jsou v sejmutém elektrickém signálu zastoupeny obálkou ultrazvukového signálu tzv. ultrazvukovými echy.

Vektor síly \mathbf{F} se snaží rotovat cívkou ve statickém magnetickém poli. Pokud jsou cívka a testovaný vzorek materiálu upevněny a změny pole se střídají v rozsahu frekvencí od několika stovek kHz do desítek MHz, dochází k posunu atomů v krystalické mřížce. V případě cívky použité v EMAT sondě, je možné uvažovat pouze první Maxwellovu rovnici ve tvaru

$$\oint \mathbf{B} dl = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad (1)$$

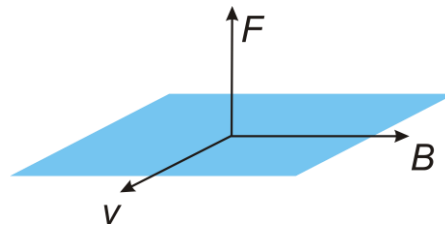
kde \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, I je střídavý proud procházející cívkou, μ_0 je permeabilita, ϵ_0 je permitivita, Φ je generovaný magnetický tok a t je čas. Lorentzovu sílu je možné vyjádřit vztahem:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

kde q je elektrický náboj, \mathbf{v} je vektor rychlosti pohybujícího se náboje a \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole. Pokud uvažujeme, že vektor elektrické intenzity \mathbf{E} má nulovou velikost, může být Lorentzova síla přepsána do tvaru:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (3)$$

Vektor Lorentzovy síly \mathbf{F} je kolmý k vektorům rychlosti \mathbf{v} a magnetické indukce \mathbf{B} . Orientace vektoru Lorentzovy síly \mathbf{F} je zobrazena na obr. 2. Orientace magnetického pole určuje typ generovaných ultrazvukových vln [2].

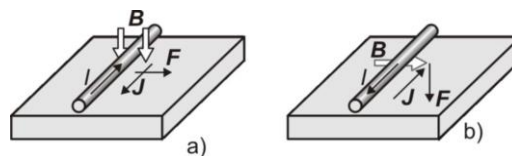


Obr. 2: Orientace vektoru Lorentzovy síly, magnetické indukce a rychlosti

Součin $q \times \mathbf{v}$ udává vektor hustoty \mathbf{J} vířivých proudů v testovaném elektricky vodivém materiálu, takže platí pro Lorentzovu sílu

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

Vliv směru vektoru \mathbf{B} na směr síly \mathbf{F} je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3: a) Generování příčné vlny, b) generování podélné vlny

Pokud je krystalická mřížka testovaného materiálu svázaná s proudem protékajícím cívkou ve směru magnetického pole jako elastického systému, zapříčiní vibrace mřížky vlastní oscilace na frekvenci, která je dána typem ultrazvukových vln generovaných v testovaném materiálu.

V testovaném vzorku o tloušťce d , kde se šíří ultrazvukové vlny s vlnovou délkou λ rychlostí c je rezonanční frekvence dána vztahem

$$f_{res} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2d}. \quad (5)$$

Rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na typu vlny, modulu elasticity G a hustotě materiálu ρ

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6)$$

Napětí ε vyvolané při pohybu krystalické mřížky je [1]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + i\omega LB\xi(0,t), \quad (7)$$

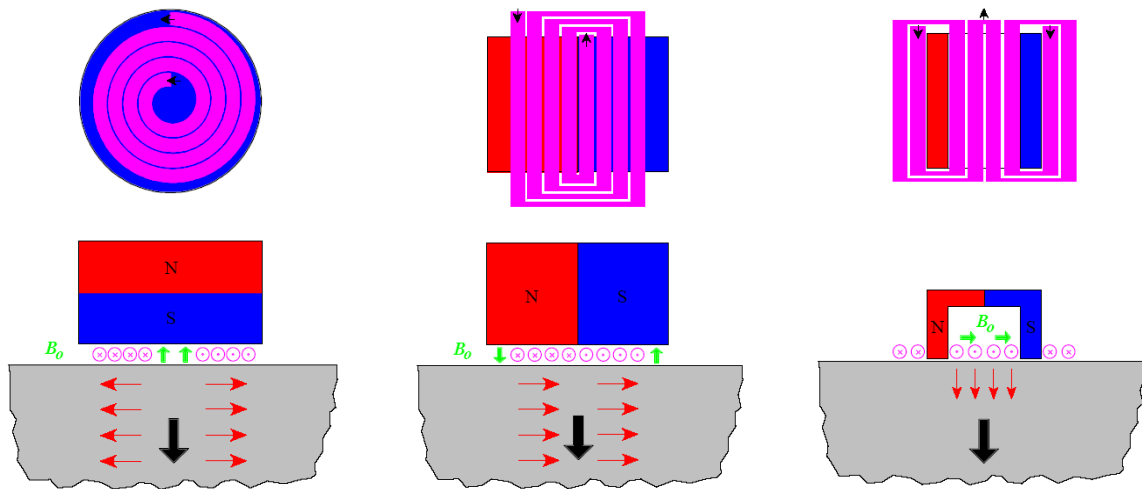
kde ε_0 je počáteční napětí, ω je úhlová rezonanční frekvence, L je konstanta, B je magnetické indukce a ξ je posun krystalické mřížky testovaného materiálu, který lze popsat vztahem

$$\xi(z,t)_\infty = e^{-j\omega t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos n\pi) \cos\left(\frac{\omega_n z}{S}\right)}{(\omega^2 - \omega_n^2 + i\omega\gamma)} \quad (8)$$

Rezonance nastává ve chvíli, kdy jmenovatel je roven nule a platí:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_n \\ \omega_n &= n 2\pi f_{res} \end{aligned} \quad (9)$$

EMAT sondy



EMAT konfigurace I

Spirálová cívka pro radiálně polarizované příčné vlny, které se šíří ve směru normály k povrchu.

EMAT konfigurace II

Čtvercová cívka pro lineárně polarizované příčné vlny šířící se ve směru normály k povrchu.

EMAT konfigurace III

Symetrická cívka pro podélné vlny šířící se ve směru normály k povrchu.

Obr. 4: Orientace vektoru Lorentzovy, magnetického pole a výsledné ultrazvukové vlny

Zvýšení citlivosti metody EMAT s využitím zpracování signálu

Tab. 1: Přínos zvýšení odstupu signálu od šumu v dB

Metoda /Af [mm]	1	2	3	4	5
Průměrování 8×	2,14	4,60	4,39	2,83	3,99
Průměrování 256×	3,92	14,24	14,19	11,08	13,61
FIR	3,32	2,82	2,45	3,62	3,48
WT	6,25	1,21	5,95	3,56	3,61
Wienerova filtrace	3,62	1,68	4,14	2,98	2,39
Slepá separace (průměrování 8×)	12,06	5,36	8,24	6,32	7,64
Slepá separace (průměrování 256×)	23,31	24,02	23,81	20,49	50,61
Vzájemná korelace (průměrování 8×)	9,72	12,10	5,69	5,97	17,87
Vzájemná korelace (průměrování 256×)	24,49	12,27	30,90	9,18	84,26

V tab. 1 vidíme přínos zvýšení odstupu signálu od šumu v dB.

Shrnutí pro metodu EMAT

Sondy EMAT mají své specifické vlastnosti, které limitují použití těchto sond v klasické defektoskopii, zvláště povrchová vodivost, která je závislá řadě faktorů, jako povrchová oxidace, povrchová koroze.

V žádném případě nelze říci, že klasická sonda o daném průměru a frekvenci bude mít podobné vlastnosti jako EMAT sonda.

Díky rozdílným principům charakteristiky sond jsou odlišné a lze sledovat jen jisté podobné rysy vycházející z fyzikálních principů.

Měření při více frekvencích, neboť sondu je možné prolakovat, je možné získat informaci o vertikálním profilu vodivosti a částečně závislost stabilizovat.

Při změně frekvence sondy mění vyzařovací diagramy.

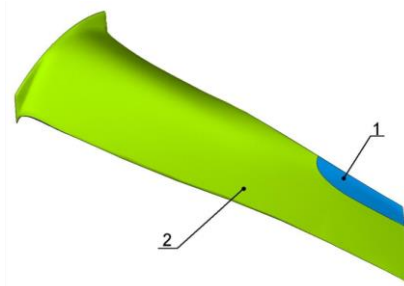
Metoda je vzhledem k možnosti generovat příčnou a podélnou vlnu vhodná pro měření mechanického napětí uvnitř materiálů a pro měření tloušťek bezkontaktní i přes barvu na povrchu a přes vrstvu tepelné izolace.

Měření rozložení mechanického napětí lopatky turbíny metodou EMAT

Konvenční metody měření využívají podélné a příčné vlny generované klasickou ultrazvukovou sondou.

Při použití klasických sond generujících příčnou vlnu je třeba použít vhodný vazební prostředek, který připomíná lepidlo. Pro přesné měření je třeba měřit ve stejném místě.

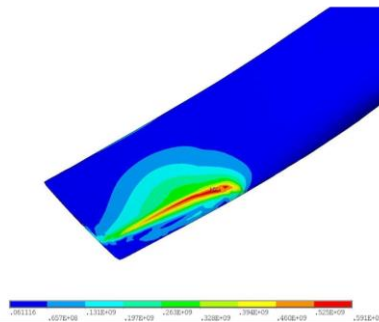
Oblast zakalení hrany lopatky je znázorněna na obr. 5. Při tepelném zpracování dojde k rozložení zbytkového napětí.



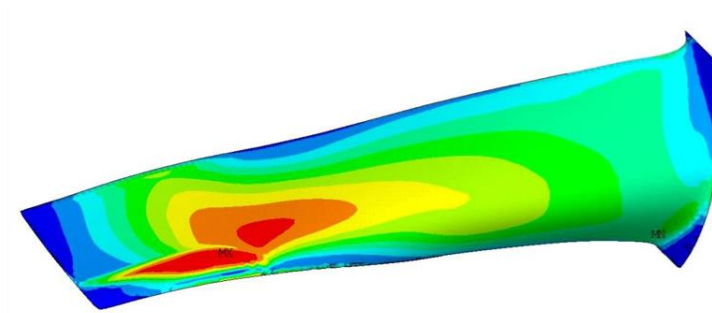
Obr. 5: Příklad oblasti zakalení hrany lopatky

Na obr. 6 až obr. 8 je zobrazen příklad rozložení zbytkového mechanického napětí lopatky turbíny.

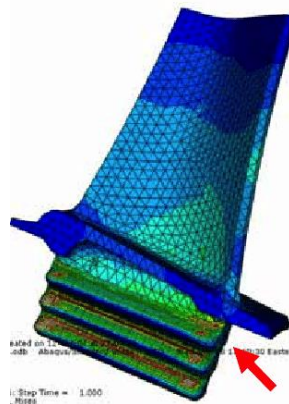
Pomocí metody EMAT je možné tato zbytková napětí měřit.



Obr. 6: Příklad zbytkového napětí hrany lopatky



Obr. 7: Příklad rozložení zbytkového napětí lopatky turbíny



Obr. 8: Příklad rozložení zbytkového napětí lopatky

Zde je výhoda metody EMAT, kde sondy dovedou generovat příčnou vlnu ne cirkulární ale orientovanou v podélném a příčném směru. Dvoukanálový defektoskop pak měří rozdíl šíření obou složek dle následující rovnice:

$$B=K(v_r - v_c). \quad (10)$$

kde B zbytkové napětí [MPa], K je konstanta podle typu oceli (např. 1 m/s = 43 MPa – závisí na třídě oceli), v_r je rychlost šíření v radiálním směru [m/s], v_c je rychlost šíření ve směru po obvodu [m/s].

V případě použití dvou zkřížených EMAT cívek, je možné měřit rozdíly rychlosti šíření bez otáčení sondy o 90° a zobrazovat přímo zbytkové napětí.

Phased Array zajímavosti

Měření hloubky zakalení

Moderní železniční nápravy využívají zakalení do hloubky, která je nastavena procesem vysokofrekvenčního ohřevu. Není však tak jednoduché bez rozříznutí a destruktivní kontroly provádět zkoušku nedestruktivně.

Na obr. 9 je viditelná tmavá část povrchu, která je zakalena po vyříznutí vzorku z nápravy.

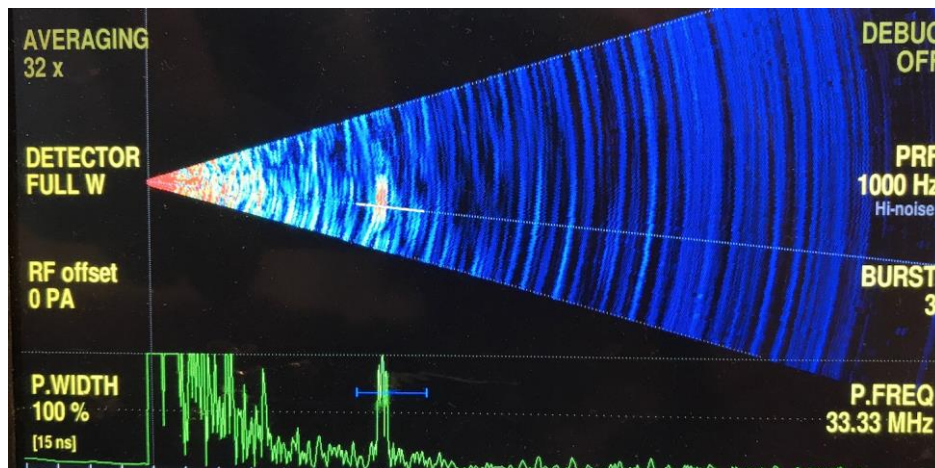


Obr. 9: Vzorek se zakalením podpovrchové vrstvy pro měření ultrazvukem

Protože jde o rozhraní mezi zakalenou a nezakalenou vrstvou, která navíc není rovnoběžná je nutno použít vysoké frekvence a miniaturní phased array sondy.

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

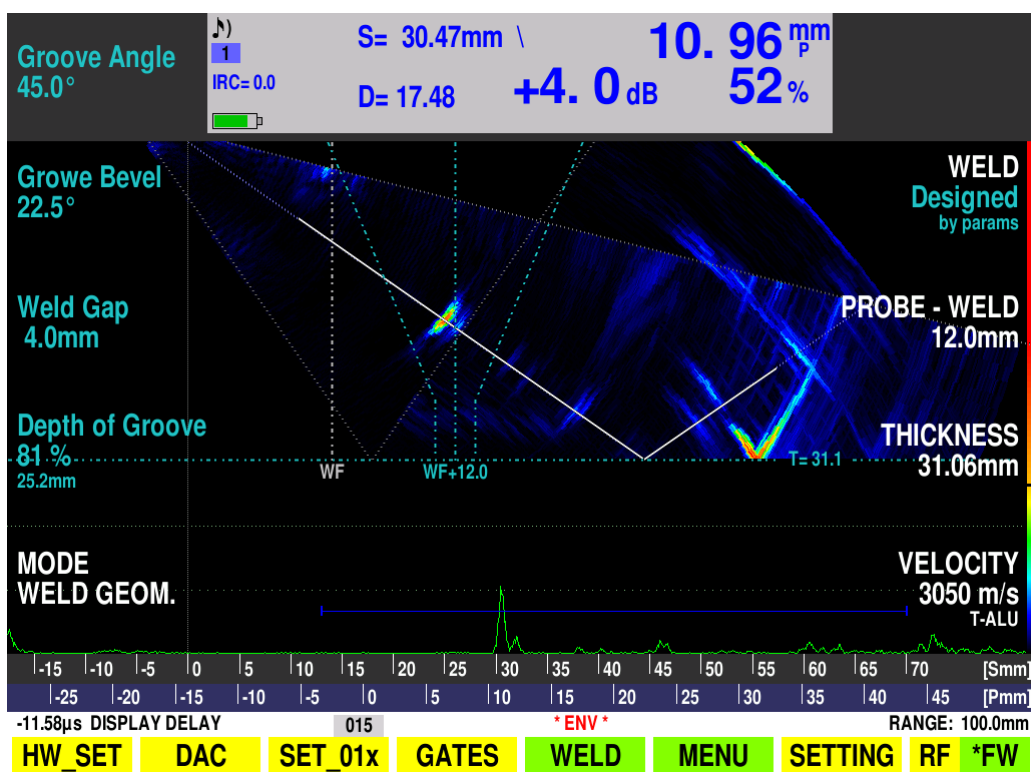
Na obr. 10 vidíme odraz od rozhraní, nejedná se o žádné vnitřní vady v materiálu nápravy. Při skenování podél nápravy není v celém průběhu tento odraz viditelný, tak praktické nasazení této metody žádá další výzkum.



Obr. 10: Odraz na rozhraní zakalení při frekvenci 33 MHz

Měření s ONLINE manažerem svaru

Při měření svarů často nemáme k dispozici přesnou geometrii a výkresy jak svar vypadá. To způsobuje chyby zobrazení.



Obr. 11: ONLINE manažer svarů

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

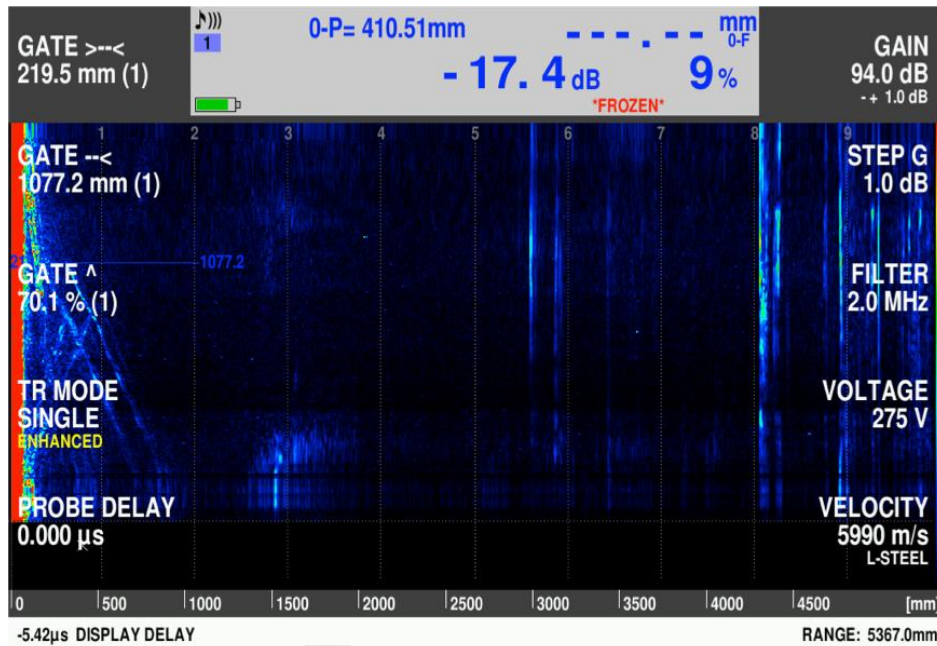
Měření vnitřních vad výkovků a rotorů se sondou s dlouhým dosahem

Zkoušení dlouhých výkovků konvenčního ultrazvuku z hlediska citlivosti a délky časové základny je možné vylepšit s využitím pulser Dio1000, který při pseudokontinuálním vysílání vysílá užší paprsek sondy a pak umožní podrobnější sken než klasické impulsní přístroje. Nový typ sondy a buzení s velkým dosahem nám však umožní vidět i obraz z osy výkovků.

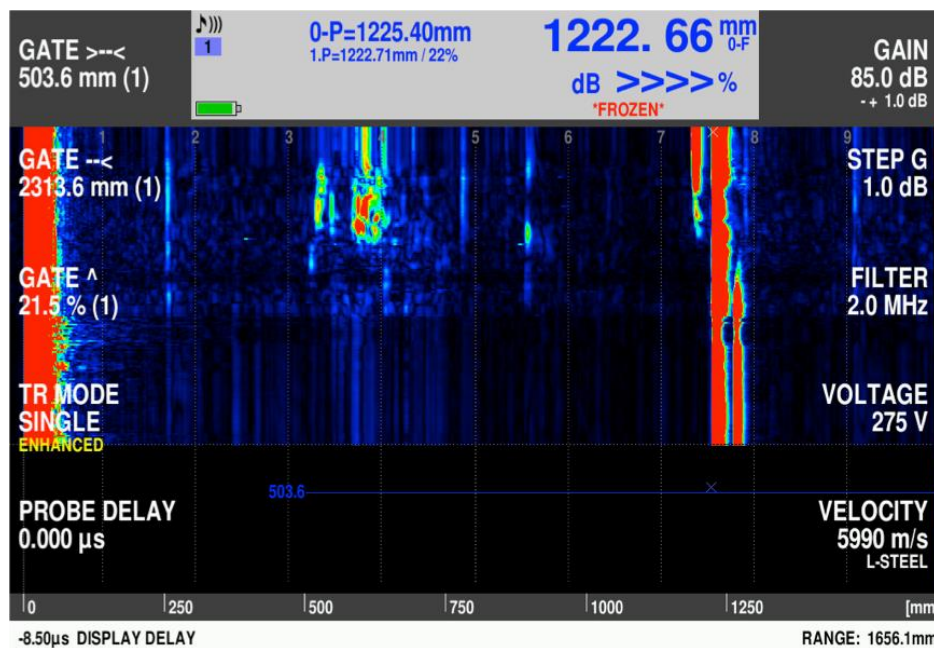


Obr. 12: Zkoušení výkovku axiálně

B-SCAN při podélném prozvučení nápravy nám dává obraz do hloubky 4500 mm. V hloubce 3000 mm a 4500 mm je koncové echo. Šířka skenu je 250 mm. Vada v hloubce 1500 mm je potvrzena bočním skenem na obr. 13 a obr. 14.



Obr. 13: B-SCAN při podélném měření výkovků



Obr. 14: B-SCAN radiální kontrolní pro vadu axiálně v hloubce 1500 mm

Literatura

- [1] Hirao, M., Ogi, H. (2003): *Emats for science and industry, Noncontacting ultrasonic measurements*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts (USA).
- [2] Dubé, N. (2007): *Advances in Phased Array ultrasonic technology applications*. Olympus NDT, Waltham, Massachusetts (USA).

SVĚDEČNÝ PROGRAM POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA JAKO DRUHÉ BARIÉRY PROTI ÚNIKU ŠTĚPNÝCH LÁTEK DO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

SURVEILLANCE PROGRAM OF NUCLEAR FUEL CLADDINGS AS A SECOND BARRIER AGAINST FISSION PRODUCTS RELEASE INTO THE ENVIRONMENT

Josef Běláč^{a)}, Stanislav Linhart^{a)}, Jana Matoušková^{a, b)}, Radomír Řeháček^{a)}, Vladislav Starý^{a)} a Martin Ševeček^{a, b)}

^{a)} ALVEL, a.s., Brno

^{b)} KJR FJFI ČVUT, Praha

Abstrakt

Zirkoniové slitiny používané jako materiál pokrytí jaderného paliva tvoří po vlastních palivových tabletách druhou fyzickou bariéru ochrany do hloubky proti úniku radioaktivních látek. Z pohledu jaderné bezpečnosti je klíčové znát a předvídat chování těchto materiálů nejen v podmínkách normálního provozu jaderného paliva v aktivní zóně reaktoru a případných havarijních stavech, ale i následně při jeho dlouhodobém skladování v bazénech vyhořelého paliva či suchých kontejnerech po dobu dalších minimálně několika desítek let. Společnost ALVEL ve spolupráci s dalšími českými organizacemi (ŠKODA JS, ÚJV Řež a Centrum výzkumu Řež) navrhla, rozpracovala a v současné době i realizuje pilotní svědečný program pokrytí jaderného paliva, jako analogii svědečného programu materiálů tělesa tlakové nádoby reaktoru. Významná část tohoto pilotního projektu je realizována ve spolupráci s JE Temelín a dalšími českými organizacemi.

Program umožňuje nejen komplexní ověření charakteristik materiálů palivového pokrytí v současnosti používaných, ale také získání dat potřebných pro podporu kvalifikace inovovaných slitin, určených pro budoucí průmyslové nasazení. Pilotní svědečný program je realizován na materiálech, které byly od roku 2014 ozařovány v aktivní zóně prvního bloku JE Temelín. V příspěvku jsou shrnuty základní charakteristiky navrženého svědečného programu, aktuální stav jeho pilotní realizace a předpokládané výstupy.

Abstract

Zirconium-based alloys used as nuclear fuel cladding materials represent the second barrier of the defence-in-depth protection against fission products release. From the point of view of nuclear safety, it is crucial to understand and be able to predict the cladding behaviour not only during its normal operation or accident conditions in the reactor core, but also during the long-term storage of the spent fuel in the spent fuel pools or dry storage casks. ALVEL has in cooperation with other Czech companies (SKODA JS, UJV Rez, and Research Centre Rez) proposed, developed, and is currently implementing the pilot Nuclear Fuel Cladding Surveillance Program (NFCSP), as an analogy to the surveillance program of a reactor vessel. Significant part of this project is implemented by ALVEL in cooperation with the Temelin NPP and other Czech organizations.

The proposed program allows not only the complex verification of the main characteristics of the fuel cladding materials in use, but also to obtain data necessary to support qualification of innovative materials (licensing) intended for industrial implementation in the future. The pilot program is being implemented on materials irradiated in the reactor core of the Temelin NPP, Unit 1 since 2014. This paper presents summary of basic characteristics of the proposed NFSCP, status of its implementation, schedule and expected outputs.

Úvod

Je široce známo, že zirkoniové slitiny se používají jako povlakový materiál jaderného paliva již několik desítek let. Z pohledu jaderné bezpečnosti je klíčové co nejlépe znát a předvídat chování těchto materiálů jak v provozních a případných havarijních podmínkách, tak i během dlouhodobého skladování (několik desítek let) již použitého paliva v bazénech či suchých kontejnerech. Tradičně se provádí zkoumání většiny charakteristik ozářeného pokrytí spolu s ozářeným palivem, což je proces, který je možno realizovat pouze v horkých komorách s odpovídající certifikací, a tedy velmi nákladný. Navíc takových zařízení je ve světě jen velmi omezený počet. Společnost ALVEL na základě zkušeností získaných v rámci projektů MCA [1] realizovaného pro Výzkumný institut Akademika Bočvara (VNIINM) v Moskvě, projektu OP-PIK programu Aplikace [2], a dalších projektů realizovaných pro ČEZ, a. s. navrhl, rozpracoval a v současné době realizuje v pilotní podobě svědečný program pokrytí jaderného paliva, jako analogii svědečného programu materiálů tělesa tlakové nádoby reaktoru. Vzhledem k tomu, že program je realizován na svědečném materiálu bez obsahu jaderného paliva (tedy neobsahuje štěpný materiál ani produkty štěpení) je možné jej realizovat i v Česku, kde nejsou horké komory kvalifikované pro práci s jaderným materiálem, a to mnohem laciněji. V podobné situaci se nachází i řada jiných zemí, provozujících jaderné reaktory.

Co je cílem svědečného programu?

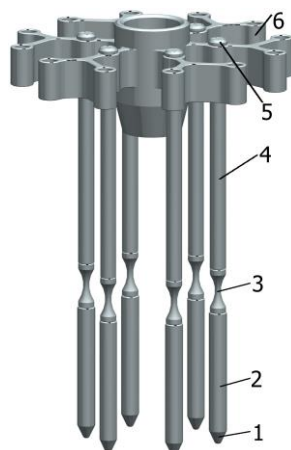
Získat relevantní informace o materiálových vlastnostech a charakteristikách palivového pokrytí, které budou odrážet reálné provozní podmínky konkrétního jaderného reaktoru (neutronové spektrum, chemický režim chladiva primárního okruhu, provozní teploty). Tyto informace pak mohou být využity jednak ke zpřesnění predikce chování paliva v průběhu provozu reaktoru, ale především k lepší charakterizaci stavu palivového pokrytí po vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny pro jeho dlouhodobé skladování jak v bazénech, tak i suchých kontejnerech v meziskladu vyhořelého paliva, které trvá desítky let a významně ovlivňuje následnou manipulovatelnost paliva před jeho transportem pro finální uložení či případné přepracování.

Jaké svědečné vzorky ozařovat a kde?

Na základě zkušeností získaných při realizaci projektu Materiálových klastrů (MCA) [1] navrhuje využít pro svědečný program analogickou konstrukci. Základní sada svědečných vzorků by byla tvořena třemi až šesti materiálovými klastry, na nichž by byly zavěšeny ampule s materiálovými vzorky vyrobené z povlakových trubek pocházejících ze stejné výrobní šarže, jako pokrytí paliva dodávaného dodavatelem. (V případě kvalifikace nové nebo modifikované slitiny by pak byla část ampulí vyrobena z referenčního a část z nového materiálu).

Uvnitř ampulí by pak v inertním prostředí (helium) byly umístěny kapsle s fragmenty povlakových trubek a případně dalších konstrukčních částí palivového souboru (vodící trubky, distanční mřížky apod.) pro zjištění radiačního růstu daného materiálu v reálném neutronovém spektru konkrétní aktivní zóny. Součástí obsahu některých ampulí by byly i kapsle s monitory fluence.

Schéma MCA je uvedeno na obr. 1 a v tab. 1 jsou uvedeny jeho základní rozměry.



Obr. 1: Schéma MCA ozařovaného na JE (není v měřítku). 1 – Koncovka ampule; 2 – Ampule s materiálovými vzorky; 3 – Zúžený krček určený k oddělení ozářených ampulí; 4 – Nosné prsty (tyčky); 5 – Šrouby; 6 – Hlavice MCA

Tab. 1: Základní rozměry MCA

Parametr	Hodnota
Počet ampulí v každém MCA	6 ks
Délka ampule (oddělovaná část)	~ 300 mm
Vnější průměr ampule	Jako u paliva
Materiál vnější ampule	Jako u paliva
Hmotnost MCA	~8 kg
Doba ozařování MCA v AZ	1-6 let

Umístění klastrů v AZ v průběhu ozařování by bylo stanoveno na základě projektu překládek a se zohledněním omezení daných konfigurací regulačních orgánů a vnitroreaktorové instrumentace. V rámci realizace projektu MCA v letech 2014-2019 bylo prokázáno, že klastry MCA mají zanedbatelný a prakticky nezjistitelný vliv na rozložení výkonu v AZ za provozu.

Plán a rozsah analýz

Hlavním cílem svědečného programu je ověření charakteristik materiálů v současnosti používaného palivového pokrytí a svarového spoje, mezi které patří mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti, creepové vlastnosti), radiační růst a vývoj mikrostruktury v závislosti na stupni ozáření, vlivu chemického režimu chladiva primárního okruhu a provozní teploty.

Přehled testů a analýz prováděných v rámci svědečného programu je uveden v tab. 2, kde je rovněž uvedeno, na jakém materiálu by byl daný typ zkoušek / testů prováděn [3, 4].

Tab. 2: Přehled prováděných analýz v rámci „svědečného programu“

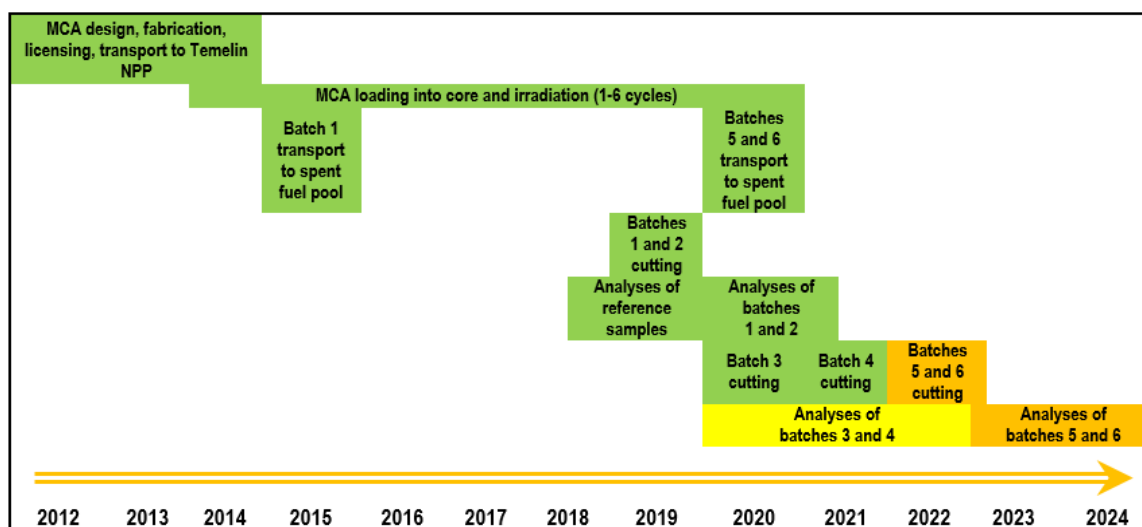
Typ analýz	Specifikace analýz	Materiál
Měření rozměrů vzorků / <i>profilometrie ampulí</i>	Měření radiačního růstu <i>In-ward creep</i>	referenční vzorky, kupóny, <i>ampule</i>
Metalografická analýza	Mikrostruktura, orientace zrn, mikrotvrdost, morfologie oxidické vrstvy	referenční vzorky, kupóny, ampule
TEM/SEM analýzy	SEM/EBSD: Velikost zrn, stupeň rekystalizace,	referenční vzorky, kupóny, ampule, <i>svarový spoj</i>

	SEM/EBSD: fázová analýza, fázová struktura a textura, dislokace <a> a <c> typu, radiačně – indukované precipitáty sekundární fáze, stupeň rekrytalizace, detailní mikrostrukturní analýza	
Mechanické zkoušky	Tahové zkoušky na AX, TR a SPEC tělesech minimálně dvě rychlosti deformace Creep / relaxace Nanoindentace	ampule <i>speciální vzorky</i> teplota do 400 °C
Stanovení fluence neutronů	Vzorky: Fe-54, Cu-63, Nb Vyhodnocení aktivit E > 0,1 MeV	monitory Fluence
<i>Stanovení obsahu vodíku</i>	<i>Neutronová radiografie/Exhalograf – vysokoteplotní vakuová extrakce</i>	<i>ampule</i>
<i>Únavové testy</i>	<i>Cyklické zkoušky na tělesech tvaru C</i>	<i>ampule</i> <i>teplota do 400 °C</i>
<i>Reorientace hydridů</i>	<i>Změna orientace hydridů v pokrytí při skladování a přechodových procesech s ním spojených</i>	<i>ampule</i>

Kurzívou jsou vyznačeny položky, které zatím neprošly pilotním ověřením.

Dosavadní zkušenosti a výstupy projektu

Samotný pilotní projekt se začal rodit v roce 2012 a jeho plánované ukončení je v roce 2024. V současné době je ukončeno ozařování všech 6 MCA z projektu [1]. U prvních dvou sad vzorků a ampulí je ukončen plánovaný rozsah testů a analýz a probíhají analýzy 3. a 4. sady; na jaro 2022 a 2023 je plánován stříh sady č. 5, respektive č. 6. Na obr. 2 [5] je uvedena časová osa vývoje celého projektu.



Obr. 2: Časová osa realizace projektu MCA

Metodiky provádění testů a analýz pro navrhovaný svědečný program palivového pokrytí byly vyvinuty a následně ověřeny na referenčním materiálu [6, 7]. Výsledky ukázaly, že je možné provádět detailní analýzu materiálových vlastností ozářeného materiálu, stejně tak i precizní a důkladné srovnání s referenčním materiálem [1].

Oddělování ozářených ampulí je prováděno pomocí zařízení POMA, které bylo vyvinuto a vyrobeno pro projekt MCA [5] (obr. 3 a obr. 4) ve spolupráci se ŠKODA JS, a probíhá v rámci odstávky reaktoru v šachtě transportního kontejneru. Odstrížené materiálové ampule jsou přemístěny ve speciální schránce do kontejneru TKS-1000 a převezeny do horkých komor ÚJV Řež a CVŘ (viz obr. 5), kde probíhá jejich rozřezání a vytrídění, extrakce kapslí

s materiálovými vzorky a příprava samotných vzorků k analýzám. Na obr. 6 a obr. 7 jsou znázorněny kapsle po jejich vytržení z odstřižených ampulí a samotné materiálové vzorky (kupóny).



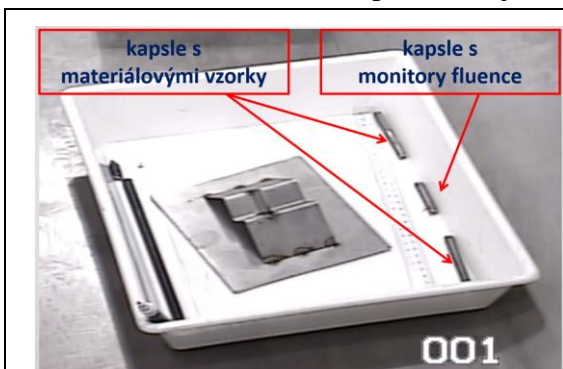
Obr. 3: Zařízení POMA



Obr. 4: Střih materiálových vzorků



Obr. 5: Transport kontejneru TKS-1000 na měřicí pracoviště



Obr. 6: Kapsle s materiálovými vzorky a monitory fluence



Obr. 7: Materiálové vzorky (kupóny)

Shrnutí a závěr

Společnost ALVEL na základě zkušeností s realizací projektů ve spolupráci s Výzkumným institutem Akademika Bočvara (VNIINM) v Moskvě, dodavatelem jaderného paliva TVEL, společností ČEZ a Skupinou ÚJV navrhl, rozpracoval a v současné době realizuje pilotní část „svědečného programu pokrytí jaderného paliva“ (SP [5]), jako analogii svědečného programu materiálů tělesa tlakové nádoby reaktoru. Tento projekt je plně realizovatelný s využitím infrastruktury dostupné v České republice. Kromě ověření charakteristik materiálů palivového pokrytí v současnosti používaných, je takovýto program použitelný rovněž ke kvalifikaci pokročilých inovovaných povlakových slitin, určených pro budoucí průmyslové aplikace. Dalším potenciálem využití získaných zkušeností a analogie tohoto programu je možnost zkoumání změn vlastností konstrukčních materiálů reaktoru (vnitroreaktorových částí) v průběhu jejich života, včetně jejich kvalifikace pro případné nové reaktory.

V rámci realizace pilotního svědečného programu vzniká i databáze materiálových vlastností TIRCLAD [8, 9]. V současné době jsou ukončeny analýzy prvních dvou sad MCA a probíhají analýzy 3. a 4. sady. V letech 2022-2023 je naplánován stříh a zpracování klastru MCA č. 5 a č. 6.

Pro období 2022 až 2028 je společností ALVEL navrhována realizace druhé fáze projektu ozařování MCA s pracovním názvem MCA-II. Cílem tohoto projektu je ověření konceptů ATF pokrytí paliva s coatingem na bázi chromu a kvalifikace slitiny E110M pro nasazení do reaktorů skupiny ČEZ. V současné době probíhají přípravná jednání mezi potenciálními účastníky tohoto projektu stran výběru a výroby materiálů, způsobů financování a realizace celého takto náročného, ale velmi přínosného projektu.

Reference

- [1] Novikov, V., Markelov, V., Shevyakov, A., Gusev, A., Běláč, J., Linhart, S., Řeháček, R., Ševeček, M., Starý, V., Shishkin, A., Grekhov, M., Pešek, P., Fenc, Z., Halodová, P. (2021): A study of irradiation-induced growth of advanced zirconium alloys after irradiation in the VVER-1000 reactor core of Temelin NPP, *Top Fuel 2021*, European Nuclear Society, Santander (Spain).
- [2] MPOČR (2017): *Projekt OP PIK – výzva APLIKACE IV – „Výzkum a vývoj technologie povrchových úprav povlakových trubek palivových elementů jaderných reaktorů pro zvýšení jejich odolnosti v provozních i havarijních podmínkách a při dlouhodobému skladování“*. Registrační číslo projektu: CZ.01.1.02/0.0/0.0/17_107/0012555, 2017-2020.
- [3] Malá, M., Zimina, M., Halodová, P., Ševeček, M., Linhart, S., Běláč, J., Srba, O.: Experimentální podpora svědečného programu pokrytí jaderného paliva. *16. konference Životnost komponent energetických zařízení*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 61-66. ISBN 978-80-261-1045-3
- [4] Gávelová, P., Halodová, P., Zháňal, P., Jarugula, R., Zimina, M., Ševeček, M., Rosnecký V.: Výzkumný program ALVEL a CVŘ pro komplexní testování a analýzy mikrostruktury pokrytí paliva Zr1Nb. *16. konference Životnost komponent energetických zařízení*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 67-73. ISBN 978-80-261-1045-3
- [5] Linhart, S., Ševeček, M., Běláč, J., Starý, V. (2019): Material Research of Zirconium-based Alloys Irradiated at Temelin NPP Reactor. *13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria).
- [6] Pešek, P., Ernestová, M., Bublíková, P. (2017): *Metodiky pro provádění měření a analýz na ozářených vzorcích – Nedestruktivní a destruktivní analýza materiálových vzorků: měření geometrie vzorků, výsledky metalografických zkoušek, stanovení mikrotvrdosti vzorků a elektronová mikroskopie (TEM)*. Zpráva ÚJV DITI 2300/91, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.
- [7] Pešek, P., Ernestová, M. (2017): *Nedestruktivní a destruktivní analýza referenčních materiálových vzorků – Měření geometrie vzorků, výsledky metalografických zkoušek, stanovení mikrotvrdosti vzorků*. Zpráva DITI 2300/90, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.
- [8] Ševeček, M., Běláč, J., Linhart, S., Řeháček, R., Malá, M., Srba, O. (2019): Introduction of the Temelin Irradiated Cladding Project – TIRCLAD 1. *Global/Top Fuel 2019*. American Nuclear Society, Seattle (USA).
- [9] Linhart, S., Běláč, J., Ševeček, M., Řeháček, R., Starý, V. (2021): Temelin Irradiated Cladding Project – TIRCLAD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*.

EXPERIMENTÁLNÍ PODPORA SVĚDEČNÉHO PROGRAMU POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA

EXPERIMENTAL SUPPORT TO FUEL CLADDING SURVEILLANCE PROGRAM

Martina Malá ^{a)}, Mariia Zimina ^{a)}, Patricie Halodová ^{a)}, Martin Ševeček ^{b)}, Stanislav Linhart ^{b)}, Josef Běláč ^{b)} a Ondřej Srba ^{a)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} ALVEL, a.s.

Abstrakt

V roce 2014 byly do reaktoru na prvním bloku jaderné Elektrárny (JE) Temelín v rámci společného projektu ČEZ, ALVEL a TVEL zavezeny materiálové klastry, tzv. MCA, s cílem získat informace o závislosti mikrostruktury a radiačního růstu pokročilých Zr slitin určených pro pokrytí paliva na obdržené fluenci. Povlakové trubky použité jako ampule pro ozařování uvedených vzorků byly použity pro realizaci společností ALVEL navrženého svědečného programu palivového pokrytí, tj. zjištění mechanických vlastností a mikrostruktury slitiny E110 používané pro pokrytí palivového proutku a ozářené v podmínkách reálného energetického reaktoru. Předložený článek popisuje použité metodiky a motivaci provedených testů a analýz důležitých pro získání dat o chování pokrytí paliva.

Abstract

In 2014, material cluster assemblies, i.e. MCA, were loaded into a reactor of the first Unit of Temelín NPP in frame of a joint project between ČEZ, ALVEL and TVEL with a goal to obtain information about a dependency of microstructure changes and irradiation-induced growth on neutron fluence values of advanced Zr alloys designed for fuel cladding. Cladding tubes utilised as ampoules for sample irradiation were used for a fuel cladding surveillance program proposed by ALVEL company, i.e. for obtaining the mechanical and microstructural properties of E110 alloy utilised for fuel rod cladding and irradiated in real power reactor conditions. Given paper describes the methodologies used, and a motivation of performed tests and analyses important to obtaining data about fuel cladding behavior.

Motivace k provedení testů a analýz vzorků

V roce 2014 byly v rámci společného projektu ČEZ, ALVEL a TVEL do aktivní zóny reaktoru na prvním bloku JE Temelín zavezeny materiálové klastry (MCA), s cílem získat informace o vývoji mikrostruktury a radiačního růstu pokročilých Zr slitin určených pro pokrytí paliva v závislosti na obdržené fluenci neutronů [1]. Povlakové trubky použité jako ampule pro ozařování vzorků byly použity pro realizaci svědečného programu palivového pokrytí navrženého společností ALVEL. Cílem bylo získat informace o mechanických vlastnostech a mikrostrukturu slitiny E110 používané pro pokrytí palivového proutku a ozářené v podmínkách reálného energetického reaktoru.

Znalost mechanických vlastností materiálu pokrytí paliva je nezbytná k provádění analýz, které slouží jako základ pro stanovování limitů pro bezpečný a spolehlivý provoz a manipulace s jaderným palivem. Řada analýz je prováděna na neozářených vzorcích pokrytí paliva, ovšem některé klíčové parametry, např. anizotropie pokrytí a jeho viskoplastické chování, se s ozářením mění a výsledky získané na neozářeném materiálu nejsou pro výpočetní analýzy ozářeného paliva během provozu nebo skladování použitelné bez pochopení vlivu radiačního poškození.

Použité metodiky testování vzorků

Pro zjištění mechanických vlastností a změn mikrostruktury slitiny E110 v závislosti na ozáření (fluenci neutronů) byly zvoleny různé typy zkoušek a analýz, z nichž je předložený článek zaměřen na následující:

- mechanické zkoušky – tahová zkouška v příčném a podélném směru vzorku za pokojové a zvýšených teplot a vysokoteplotní creepová zkouška,
- hodnocení mikrostruktury pomocí transmisní elektronové mikroskopie a skenovací elektronové mikroskopie.

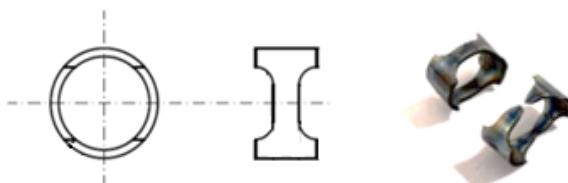
Následující text je věnován vyvinutým metodikám pro mechanické testování a analýzy mikrostruktury ozářených vzorků pokrytí paliva na pracovišti horkých komor a Centra vysoce citlivých analytických přístrojů společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Zjištění mechanických vlastností

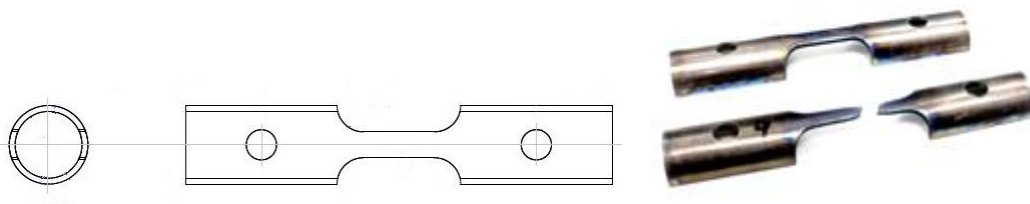
Pro zjištění mechanických vlastností pokrytí paliva je zapotřebí provést tahovou zkoušku za pokojové a zvýšených teplot a creepovou zkoušku za zvýšených teplot. Pro všechny zvolené typy mechanických zkoušek bylo nutné vyvinout metodiky jejich provedení, a to včetně návrhu zkušebních těles (ZT), postupu jejich výroby a provedení mechanických zkoušek včetně návrhu úchytu vzorků ve strojích.

Pro účely zkoušení ozářených vzorků byly metodiky vyvinuty pro použití v horkých komorách, kde jsou manipulace se vzorky prováděny pomocí dálkových manipulátorů [2-4]. Zde je nutné podotknout, že zkušební tělesa jsou poměrně malých rozměrů. Samotný vnější průměr pokrytí paliva je pod 1 cm. Vyrobená zkušební tělesa jsou tedy špatně uchopitelná už pouhou rukou, což si tím vyzkoušel během vývoje metodik na neozářených zkušebních tělesech. Bylo tedy nutné najít způsob, jak efektivně a bezpečně se vzorky pomocí manipulátorů nakládat a jak je založit do zkušebních strojů.

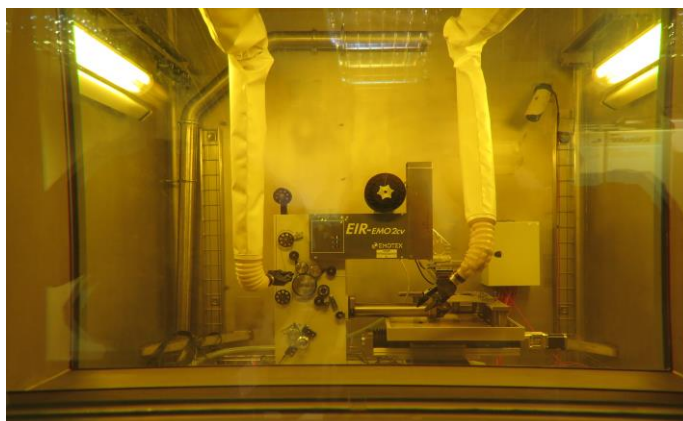
Optimální tvar zkušebních těles byl stanoven pomocí výpočtů. Modelování bylo provedeno v ÚJV Řež, a. s. kódem ABAQUS [2, 3]. Zvolena byla zkušební tělesa v příčném (TR) (viz obr. 1) a podélném (AX) směru povlakové trubky (viz obr. 2). Zkušební tělesa jsou vyráběna pomocí elektrojiskrové řezačky EIR-EMOCV umístěné v horké komoře (viz obr. 3) dle stanovené výkresové dokumentace [2].



Obr. 1: Rozměry TR tělesa a ukázka TR těles před a po tahové zkoušce



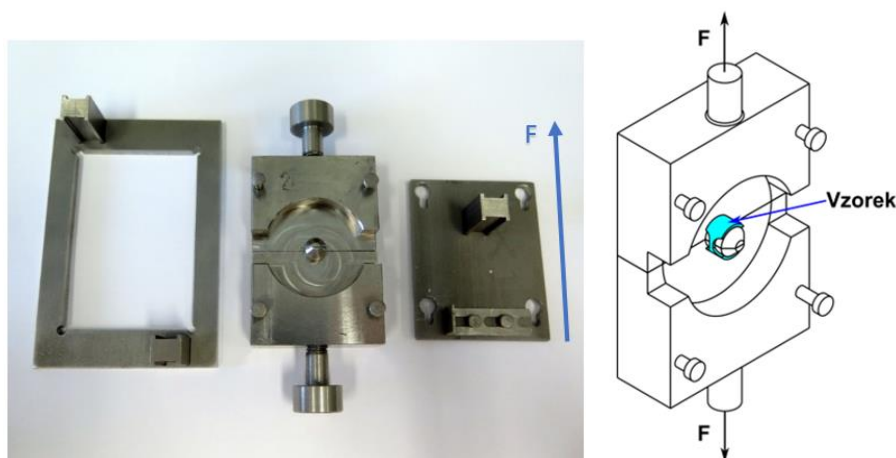
Obr. 2: Rozměry AX tělesa a ukázka AX těles před a po tahové zkoušce



Obr. 3: Elektrojiskrová rezačka umístěná v horké komoře

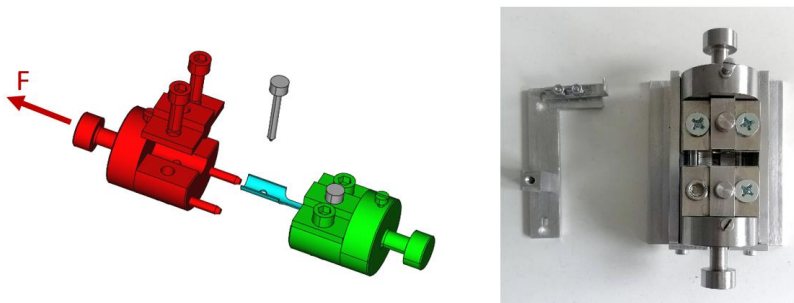
Po výrobě zkušebních těles následuje čištění těles a přesné měření rozměrů pomocí automatického multisenzorového optického měřicího stroje VERTEX umístěného v jiné horké komoře. Nejdůležitější rozměry zkušebních těles jsou označeny ve výkresech a zadány do protokolu o měření. Měření se provádí podle platného interního pracovního postupu. Vzhledem k malým rozměrům zkušebních těles je každé těleso vloženo do plastové ampulky, která je předem označena číslem vzorku. Každé zkušební těleso je tak jednoznačně identifikovatelné a spárované s kódem ampule MCA, ze které těleso pochází.

Pro navržená TR tělesa byl navržen a zhotoven držák, který sestává z rámu pro uchycení držáku, půlených tahových čelistí a krytu pro držení přípravku pohromadě při jeho vkládání do stroje. Těleso TR je umístěováno na trn nacházející se uprostřed přípravku, na nějž je během tahové zkoušky aplikována tažná síla. Její směr je vyznačený šipkami (viz obr. 4) [2].



Obr. 4: Držák tělesa TR pro zkoušky v příčném směru vzorku

Pro navržená AX tělesa byl navržen a zhotoven držák, který sestává z korýtka pro polohování držáku, půlených tahových čelistí a krytu ve tvaru „L“ pro držení přípravku pohromadě při vkládání do stroje. Těleso je vkládáno do středu přípravku pomocí centrovacích čepů a utahovacích šroubů. Tažná síla je aplikovaná ve směru vyznačeném šipkou (viz obr. 5) [2].



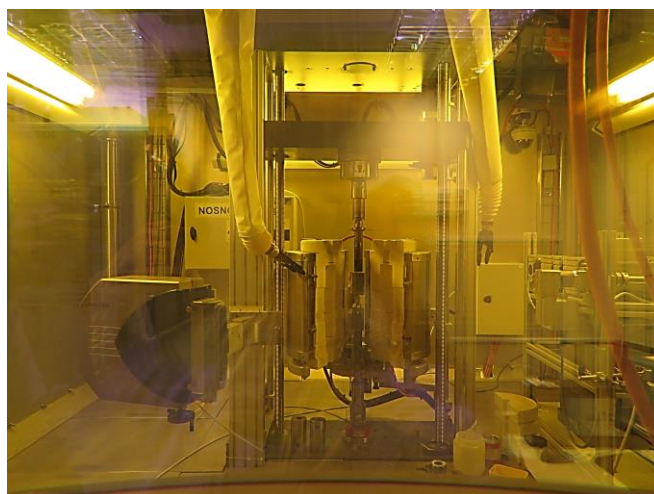
Obr. 5: Držák tělesa AX pro zkoušky v podélném směru vzorku

Zakládání zkušebních těles do zkušebních strojů a veškeré manipulace s tělesy i se vzorky jsou prováděny manipulátory za použití kamerového systému (viz obr. 6).



Obr. 6: Dálková manipulace se vzorky uvnitř horké komory

Tahové zkoušky na zkušebních tělesech jsou prováděny na elektromechanickém stroji Zwick Kappa DS50, který umožňuje maximální zatížení v tahu 50 kN a maximální zkušební teplotu až 800 °C (viz obr. 7). Tento stroj splňuje normu DIN EN ISO 7500-1. Měření prodloužení zkušebního tělesa během zkoušky je prováděno snímáním polohy příčnicku a/nebo použitím laserového extenzometru s přesností měření dle ISO 9513 třída 1. Zkoušky jsou prováděny při pokojové teplotě a teplotách 300 °C a 350 °C. Teplota je regulována pomocí tří termočlánků umístěných v blízkosti zkušebních těles uchycených ve stroji během zkoušky.



Obr. 7: Elektromechanický stroj Zwick Kappa DS 50 kN

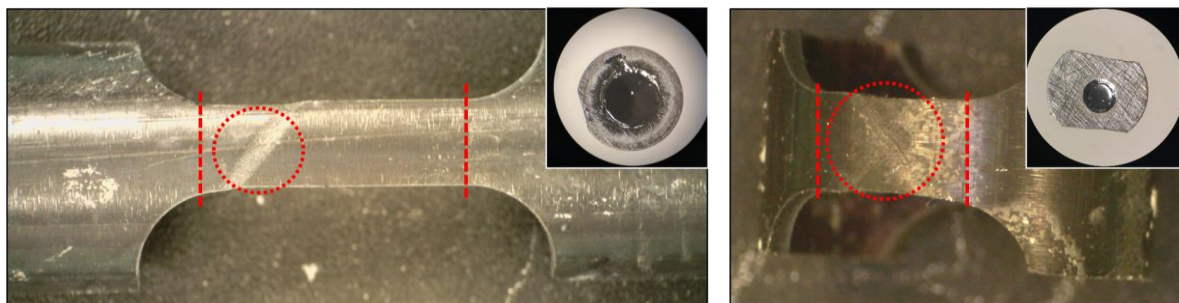
Metodiky provedení tahových a creepové zkoušky byly vyvinuty s ohledem na získání dat z testování ozářených, ale i neozářených vzorků zirkoniových slitin důležitých z hlediska pro-

vozu a manipulací s palivem. Mechanické zkoušky jsou zaměřeny jednak na krátkodobé mechanické vlastnosti při rychlostech deformace $0,1 - 0,0001 \text{ s}^{-1}$, které jsou relevantní pro přechodové podmínky během provozu a nehod při manipulacích s palivem. Dále jsou mechanické zkoušky zaměřeny na creep při provozních teplotách, jež je relevantní pro simulaci namáhání povlakové trubky způsobeném změnami výkonu během provozu a při najíždění na výkon.

Hodnocení mikrostruktury materiálu

Mikrostrukturními analýzami je zjišťován stav materiálu v nedeformovaném stavu a ve stavu deformovaném, tj. po tahové zkoušce, aby bylo možné zjistit více informací o způsobu deformace materiálu během tahové zkoušky. Jelikož již samotná zkušební tělesa mají malé rozměry, bylo i v tomto případě nutné najít způsob, jak vyrobit transparentní folii pro analýzy na transmisním elektronovém mikroskopu (TEM) ze zakřiveného povrchu povlakové trubky [2].

Pro účely analýz mikrostruktury pomocí TEM byl zvolen postup výroby transparentních folií průměru 3 mm v tečné rovině stěny povlakové trubky, resp. zkušebního tělesa, který je diskutován ve článku Petry Gávelové a kolektivu [5]. Příklad místa odběru disku ze zkušebních těles v podélném a příčném směru povlakové trubky je na obr. 8.



Obr. 8: Odběr vzorku z deformovaných oblastí zkušebních těles s naznačením disku 3 mm (vlevo z AX a vpravo z TR tělesa), v pravém horním v rohu vždy výsledná fólie připravená pro TEM analýzu

Mikrostruktura nedeformovaného vzorku a vzorku po deformaci je hodnocena pomocí vysokorozlišovacího skenovacího transmisního elektronového mikroskopu (High Resolution-Scanning Transmission Electron Microscope, HR-STEM, viz obr. 9, pro vyhodnocení rozdílů v nedeformované a deformované mikrostruktuře a pro porovnání změn s mikrostrukturou po ozáření v energetickém reaktoru [2].



Obr. 9: Mikroskopy HR-STEM (vlevo), FEG-SEM (vpravo)

Pro stanovení zastoupení chemických prvků v precipitátech je používána chemická analýza tenkých folií pomocí EDS. Analýza je prováděna pomocí SDD window-less EDS detektoru

X-Max^N 80 mm² (Oxford Instruments) v módu STEM. Zpracování dat probíhá pomocí softwaru AztecTEM.

Pro doplnění analýz pomocí TEM je používána technika skenovacího elektronového mikroskopu (FEG-SEM, viz obr. 9) s detektorem EBSD (Electron BackScattered Diffraction) aplikovaná přímo na připravených fóliích. Metoda je používána k analýze větší oblasti vzorku pro vyhodnocení zrn, než tomu je u metody BF-TEM. EBSD poskytuje informaci o velikosti, orientaci zrn po deformaci a lokální misorientaci v zrnech, tedy identifikuje oblasti s vyšší mírou deformace (vyšší hustotou dislokací) [2].

Shrnutí

K získání informací o chování materiálu zirkoniové slitiny E110 používané pro pokrytí palivového proutku, zejména jeho mechanických vlastnostech a změnách mikrostruktury s obdrženou fluencí neutronů v rámci svědečného programu palivového pokrytí navrženého společností ALVEL, byly vyvinuty speciální metodiky provedení zkoušek a analýz ozářených vzorků v horkých komorách a na pracovišti Centra vysoce citlivých analytických přístrojů ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. Metodiky byly vyvinuty v roce 2018 a od té doby jsou aplikovány na ozářených vzorcích pro plnění cílů stanovených ve svědečném programu.

Pro ozářený materiál povlakové trubky jsou získávána data ohledně napětí na mezi kluzu, napětí a deformace při porušení během tahu v příčném a podélném směru povlakové trubky v závislosti na obdržené fluenci neutronů, a to při teplotě 350 °C, která je brána pro normální provoz reaktoru, a dále teplotách prostředí a 300 °C a vysokoteplotní creep materiálu povlakové trubky při teplotách 300 °C a 350 °C. Data jsou použita pro výpočetní analýzy a také pro srovnání s daty získanými na zahraničních pracovištích (např. Studsvik ve Švédsku, RIAR v Rusku) [3].

Literatura

- [1] Ševeček, M., Běláč, J., Linhart, S., Řeháček, R., Malá, M., Srba, O. (2019): Introduction of the Temelin Irradiated Cladding Project – TIRCLAD 1. *Global/Top Fuel 2019*, American Nuclear Society, Seattle (USA).
- [2] Malá, M., Zimina, M., Dostál, M., Klouzal, J., Gávelová, P., Duchoň, J., Halodová, P., Fencel, Z., Švrčula, P., Zháňal, P. (2018): *Poradiační testování zirkoniové slitiny E110. Etapa 1 – Návrh analytických metod, zařízení a metodik pro charakterizaci a analýzy vzorků pro následující etapy*. Výzkumná zpráva, č. 2165, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Husinec – Řež.
- [3] Zimina, M., Scatigno, G., Klouzal, J., Malá, M. (2020): *Mechanical and Microstructural Studies of Zr-1Nb Alloy Cladding for Fuel Rods*. *Jaderná energie*, roč. 1 [66] 2020 (speciální číslo), str. 62-65.
- [4] Srba, O., Zimina, M., Švrčula, P. (2019): Evaluation of mechanical properties of Zr cladding tubes for nuclear power plants. *56th Annual Meeting on Hot Laboratories and Remote Handling*, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Mamallapuram, Tamil Nadu (India), pp. 84-85.
- [5] Gávelová, P., Halodová, P., Zháňal, P., Jarugula, R., Zimina, M., Ševeček, M., Rosnecký, V. (2021): Výzkumný program ALVEL a CVŘ pro komplexní testování a analýzy mikrostruktury pokrytí paliva Zr1Nb. *16. konference Životnost komponent energetických zařízení*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 67-73. ISBN 978-80-261-1045-3

VÝZKUMNÝ PROGRAM ALVEL A CVŘ PRO KOMPLEXNÍ TESTOVÁNÍ A ANALÝZY MIKROSTRUKTURY POKRYTÍ PALIVA Zr1Nb

ALVEL AND CVR RESEARCH PROGRAM FOR COMPLEX TESTING AND MICROSCOPY EXAMINATION OF Zr1Nb FUEL CLADDINGS

Petra Gávelová ^{a)}, Patricie Halodová ^{a)}, Pavel Zháňal ^{a)}, Rajesh Jarugula ^{a)}, Mariia Zimina ^{a)}, Martin Ševeček ^{b)} a Vít Rosnecký ^{a)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} ALVEL, a.s.

Abstrakt

Pokrytí paliva brání úniku štěpných produktů během provozu jaderného reaktoru i při skladování vyhořelého jaderného paliva. Materiály pokrytí tak musí odolat extrémním podmínkám, tj. mechanickému namáhání za vysokých teplot v korozním prostředí a účinkům radiace. Ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) probíhá komplexní testování standardních typů pokrytí paliva i ATF povlaků nezbytné pro provedení výpočetních analýz pro provoz paliva v reaktoru i pro jeho skladování a zajištění lepší přenositelnosti a využití měření v rámci výzkumných programů na neozářených vzorcích. Příspěvek zaměřený na výzkum slitiny Zr1Nb používané v reaktorech typu VVER a testované po ozařování v aktivní zóně jaderného energetického reaktoru VVER-1000 v rámci projektu realizovaného ve spolupráci ALVEL, a.s. a CVŘ, zahrnuje mechanické testování ozářeného palivového pokrytí v horkých komorách a zaměřuje se na způsob odběru transparentních vzorků – fólií pro hodnocení radiačně-indukovaného poškození metodami elektronové mikroskopie. Z radiačních vad, které mají přímý vliv na změnu mechanických vlastností s narůstající dávkou ozáření, byly po 1. a 2. roce ozařování pozorovány zejména homogenně rozložené radiačně-indukované nano-precipitáty a dislokační smyčky typu <a> a <c>.

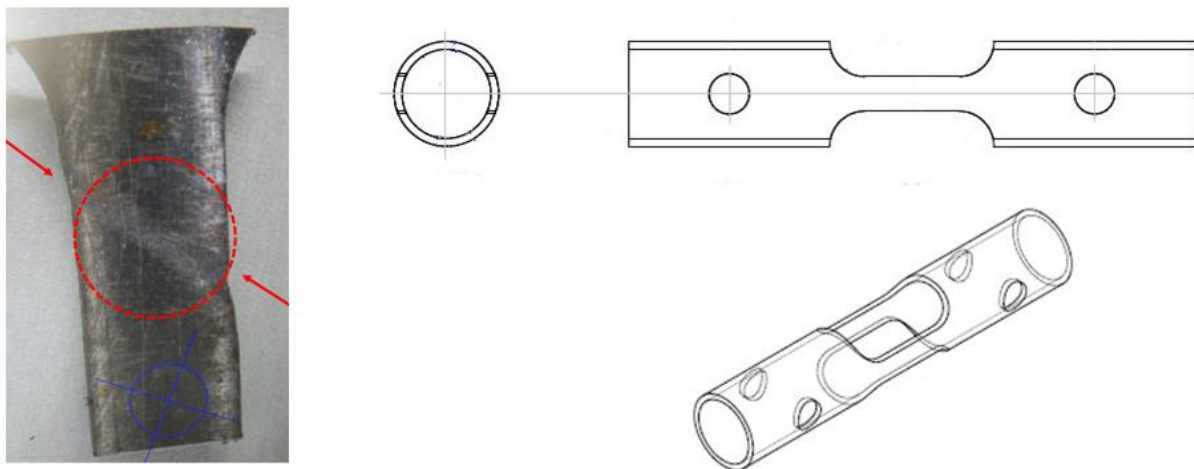
Abstract

Nuclear fuel claddings prevent against a release of fission products during nuclear power plant operation and spent fuel storage. Cladding materials must resist to extreme conditions in the reactor core, i.e., mechanical stress at elevated temperatures in the corrosion environment and the effect of irradiation. In the Research Centre Řež (CVR), the standard cladding tube materials as well as ATF claddings are tested to perform computational analyses for fuel operation in the reactor core and its storage and to ensure a better transferability and usage of measurements in the research programs focused on non-irradiated samples. The contribution focused on the Zr1Nb alloy used in VVERs and tested after irradiation in the reactor core of VVER-1000 power reactor in the frame of the joint project of ALVEL and CVR includes the mechanical testing in hot-cells and focuses more on preparation of transparent foils for radiation-induced defects characterization by electron microscopy methods. After 1st and 2nd year of irradiation, the radiation damage having the significant influence on a change of mechanical properties, was evaluated as homogeneously distributed radiation-induced precipitates and <a> and <c> dislocation loops.

Testování ozářených materiálových vzorků slitiny Zr1Nb

Povlakové trubky Zr1Nb byly ozářeny v aktivní zóně jaderného energetického reaktoru VVER-1000 po dobu 1-6 let, přičemž příspěvek se zabývá vzorky po 1. a 2. roce ozařování (míra radiačního poškození je přibližně na hodnotě 2,5 dpa po jednom roce ozařování [1]). Z ozářených standardních povlakových trubek ze slitiny Zr1Nb byla vyrobena zkušební tělesa pro mechanické zkoušky v příčném (Ring Tensile Test, RTT) a podélném (Axial Tensile Test,

ATT) směru a zkoušky vysokoteplotního tečení (creep). Z nedeformované části trubky i deformované oblasti po tahové zkoušce byl proveden odběr vzorků (transparentních fólií) pro transmisní (TEM) a skenovací (SEM) elektronovou mikroskopii, které kombinací vhodných metod charakterizují a kvantifikují vzniklé radiačně-indukované (RI) poškození a dokumentují mechanismus deformace Zr-slitin po jednotlivých letech ozařování. Mikrostrukturní analýza tak slouží k objasnění příčin změn mechanických vlastností projevujících se značným zpevněním materiálu (nárůst meze kluzu a meze pevnosti), na kterou mají RI defekty přímý vliv. U ozářených vzorků po tahové zkoušce na rozdíl od neozářených je patrný pás skluzu materiálu, který má přibližně 50° úhel k hraně vzorku. Na obr. 1 je ukázka ATT tělesa i část vzorku po axiální tahové zkoušce (levý snímek) odebrané rozřezem v horké komoře s označením oblasti, ze které je po broušení nutné vyseknout disk o průměru 3 mm na přípravu tenké fólie pro TEM. Příspěvek se zaměřuje na hodnocení RI poškození na transparentních TEM fóliích připravených z nedeformované oblasti odebrané z odřezku materiálu vzniklého při přípravě ATT těles.

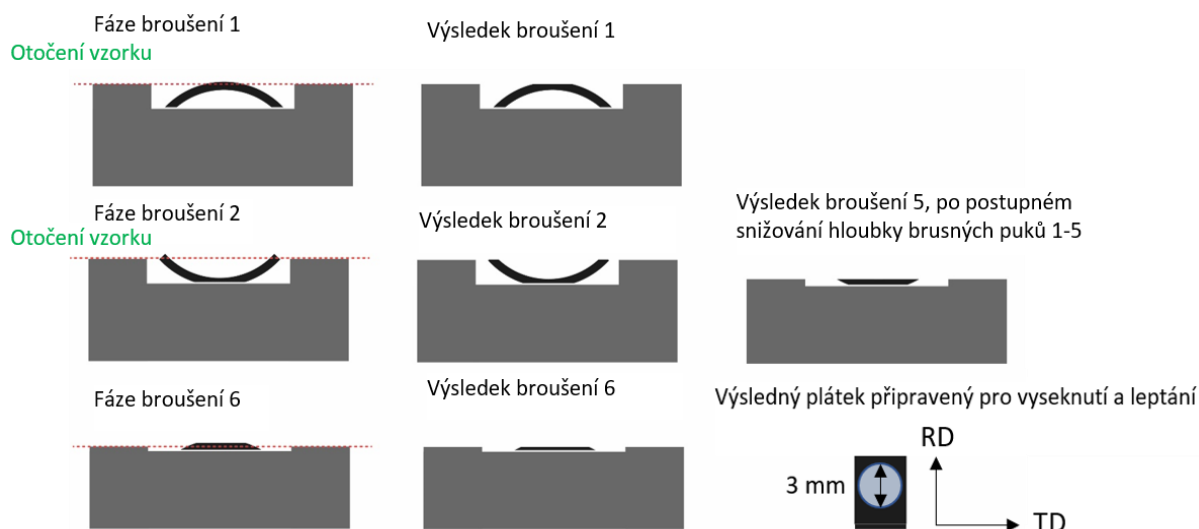


Obr. 1: Axiální zkušební těleso vyrobené z ozářených povlakových trubek slitiny Zr1Nb, pro mechanické zkoušky byl použit poloviční segment trubky. Levý snímek zobrazuje část vzorku po axiální tahové zkoušce odebrané rozřezem v horké komoře (červené kružnice označují místa, ze kterých je po broušení nutné vyseknout 3 mm disk na přípravu tenké fólie pro TEM).

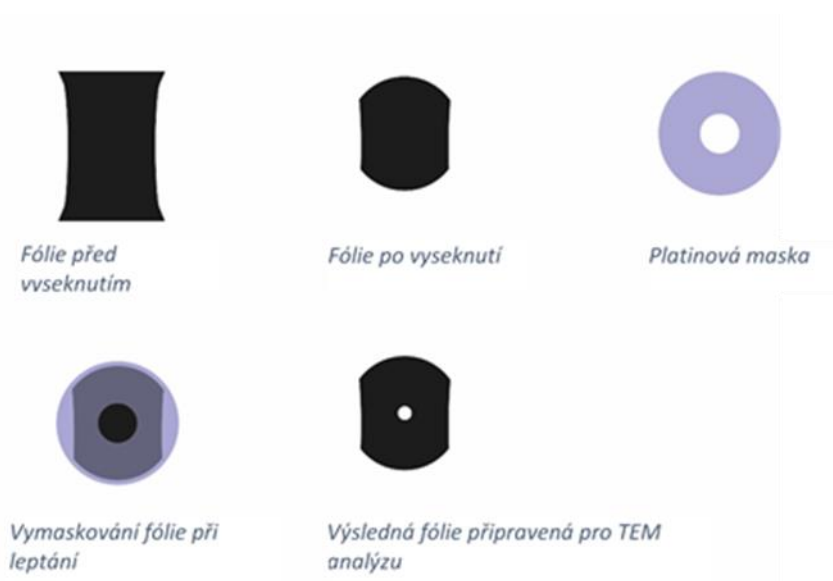
Příprava vzorků pro hodnocení radiačně-indukovaného poškození

Příprava vzorků (transparentních fólií určených primárně pro transmisní elektronovou mikroskopii, TEM) z ozářených Zr-slitin probíhá ve stíněných horkých komorách (rozřez vzorků – odběr nedeformované oblasti vzorku a odběr lokalizované části deformovaného vzorku) a stíněném rukavicovém boxu. V rukavicovém boxu se vzorky broušením upravují na požadovanou tloušťku $\sim 100 \mu\text{m}$ a poté probíhá vyražení disků a elektrolytické leštění do podoby transparentní fólie se standardním průměrem 3 mm. Nedeformovaný ozářený vzorek je připraven z odřezku materiálu vzniklého při přípravě ATT těles. Odřezek má zakřivený tvar a dále se upravuje broušením na speciálně upravených brusných pucích. Z výsledného orientovaného plátku o tloušťce $\sim 100 \mu\text{m}$ se pak razníkem vyseknou disky o průměru 3 mm (obr. 2). Vybroušená část deformovaného vzorku po tahové zkoušce má však nestandardní rozměry [2] (ve směru tahu $< 3 \text{ mm}$) a zároveň je nutné lokalizovat deformační pásy, vzniklé při působení napětí. V tomto případě bylo vyražení fólie provedeno tak, aby pásy lokalizované deformace procházely přibližně středem vyseknuté oblasti. Průběh přípravy TEM fólie je schematicky znázorněn na obr. 3, kde levý snímek zobrazuje vzorek s viditelným deformačním pásem. Elektrolytické

leptání je následně prováděno na neúplném disku, k leptání se využívá „vymaskování“ okrajových částí vzorku pomocí platinového disku o průměru 3 mm.



Obr. 2: Schématické znázornění postupu přípravy transparentní fólie z ozářené nedeformované části vzorku, tj. z odřezku materiálu vzniklého při přípravě ATT těles



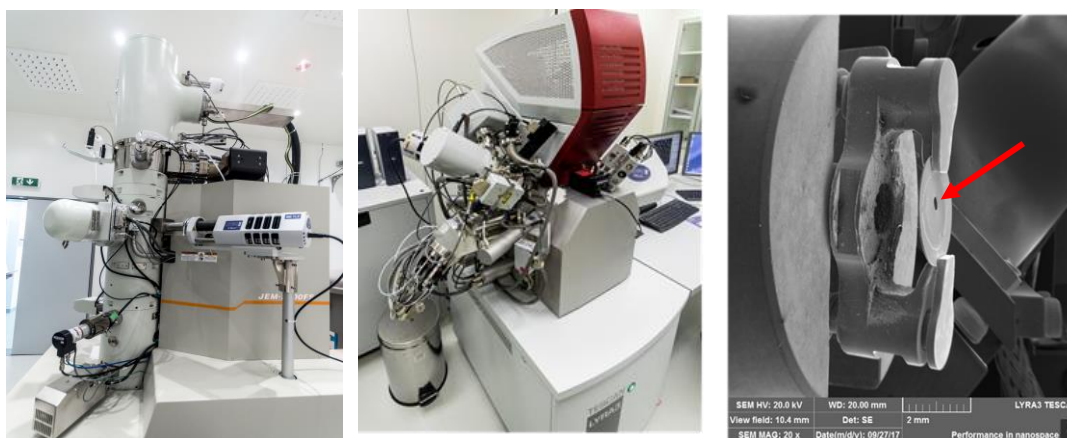
Obr. 3: Schématické znázornění postupu přípravy transparentní fólie z ozářených vzorků po tahové zkoušce. Vyseknutí neúplného 3 mm disku, „vymaskování“ disku pro leptání a výsledný tvar fólie připravené pro TEM analýzu.

Použité metody elektronové mikroskopie

Radičně-indukované defekty (RID) byly analyzovány pomocí TEM JEOL JEM 2200FS (obr. 4 – levý snímek) s urychlovacím napětím 200 kV, který je umístěn v kontrolovaném pásmu. Pro strukturní analýzu bylo využito zobrazení ve světlém poli (BF), difrakční analýza se selekční clonou (SAED) a zobrazení v tmavém poli (DF). Pro chemickou analýzu byla využita energiově disperzní spektroskopie (EDX), pro detailní analýzu chemického složení precipitátů v mikrostruktuře bylo využito rovněž metod zobrazení v módu STEM (STEM-HAADF, STEM-EDX) [3].

Pro porovnání mikrostruktury z větší oblasti zájmového vzorku byla provedena krystalografická analýza na FEG-SEM Tescan Mira 3GMU umístěným v polohorké komoře a vybaveným

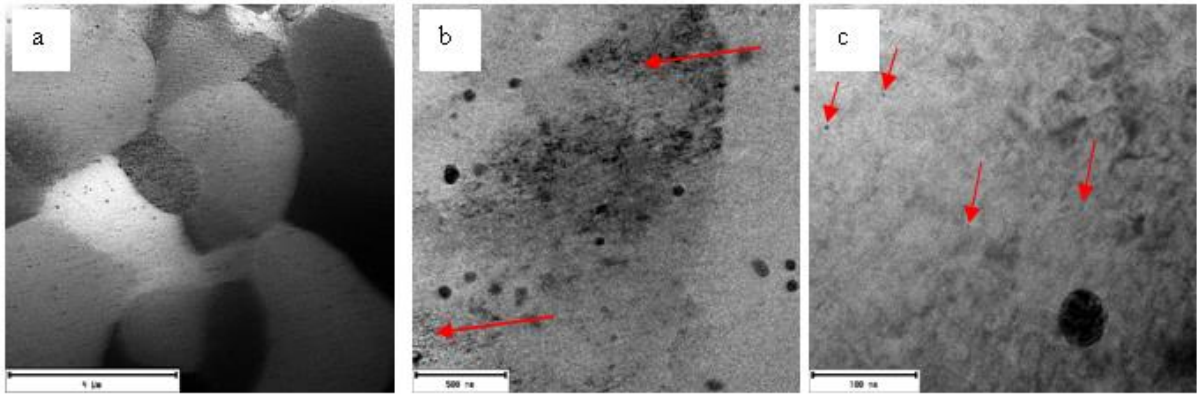
systémem EBSD Nordlys II (Oxford Instruments), obr. 4 – prostřední snímek. EBSD analýza byla provedena při urychlovacím napětí 20 kV na transparentních fóliích (obr. 4 – pravý snímek) v druhém kroku po TEM analýze. EBSD mapy byly pořízeny s rozlišením $10\,000 \times 10\,000$ pixelů, velikostí kroku $0,1\ \mu\text{m}$ a analyzovanou oblastí vzorku o rozměrech $100 \times 100\ \mu\text{m}$. Z EBSD map pak byla stanovena průměrná velikost a distribuce zrn, stupeň rekrytalizace a přednostní orientace zrn. Pro posouzení míry deformace zrn způsobené nárůstem hustoty dislokací lze z EBSD map získat informaci o malých změnách orientace, ze kterých jsou vyloučeny body asociované s hranicemi zrn. Analýza lokální misorientace (Kernel Average Misorientation, KAM) lze využít k relativnímu vzájemnému posouzení hustoty dislokací uvnitř zrn (vyjádřených mírnou změnou orientace) analyzovaných vzorků. V příspěvku je z EBSD výsledků zmíněna pouze analýza lokální misorientace jako vhodný doplněk k TEM analýzám dislokací [3].



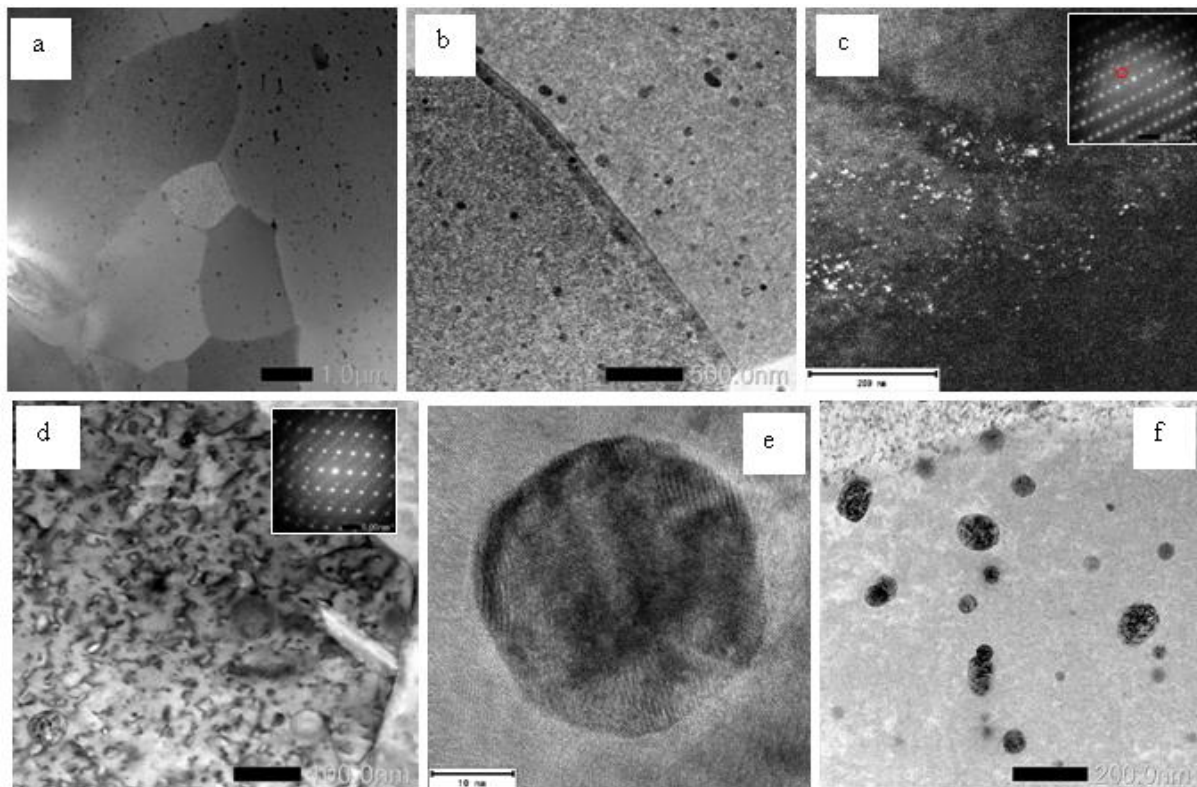
Obr. 4: Levý snímek – TEM v kontrolovaném pásmu. Prostřední snímek – FEG-SEM v polo-horké komoře. Pravý snímek – transparentní TEM fólie v komoře FEG-SEM připravena pro EBSD analýzu (označena šipkou).

Mikrostrukturní analýza: hodnocení radiačního poškození nedeformovaných materiálových vzorků po 1. a 2. roce ozařování

Analýza mikrostruktury Zr1Nb po ozáření ukázala přítomnost rekrytalizovaných polyedrických zrn fáze α -Zr s hexagonální mřížkou s distribuovanými precipitáty sekundární fáze β -Nb a $\text{Zr}(\text{Nb},\text{Fe})_2$ o srovnatelné objemové hustotě (přehledové snímky na obr. 5a, obr. 6a). Průměrná velikost zrn referenčního neozařeného vzorku bez deformace je srovnatelná s velikostí zrna nedeformovaného vzorku po 1. i 2. roce ozařování. Vlivem interakce Zr-slitiny s neutronovým zářením dochází ke vzniku radiačně-indukovaných (RI) defektů v mikrostruktuře v nano-měřítku (obr. 5b, obr. 6b). RI poškození se projevuje především vznikem dislokačních smyček typu $\langle a \rangle$ uvnitř původních α -Zr zrn, pro které je v neozařeném stavu charakteristická nízká hustota dislokací. U vzorků po 2. roce ozařování byly navíc pozorovány dislokační smyčky typu $\langle c \rangle$ o nízké hustotě. Zobrazení RI dislokací je demonstrováno na obr. 6d. Přítomnost RI dislokačních smyček se projevuje také při analýze SEM-EBSD zvýšením hodnot lokální misorientace (viz EBSD analýza). Dalším projevem radiačního poškození je vznik RI nano-precipitátů v matici, které byly pozorovány po 1. i 2. roce ozařování (obr. 5c, obr. 6c, obr. 6f). Amorfizace původních precipitátů sekundárních fází nebyla pozorována (obr. 6e).



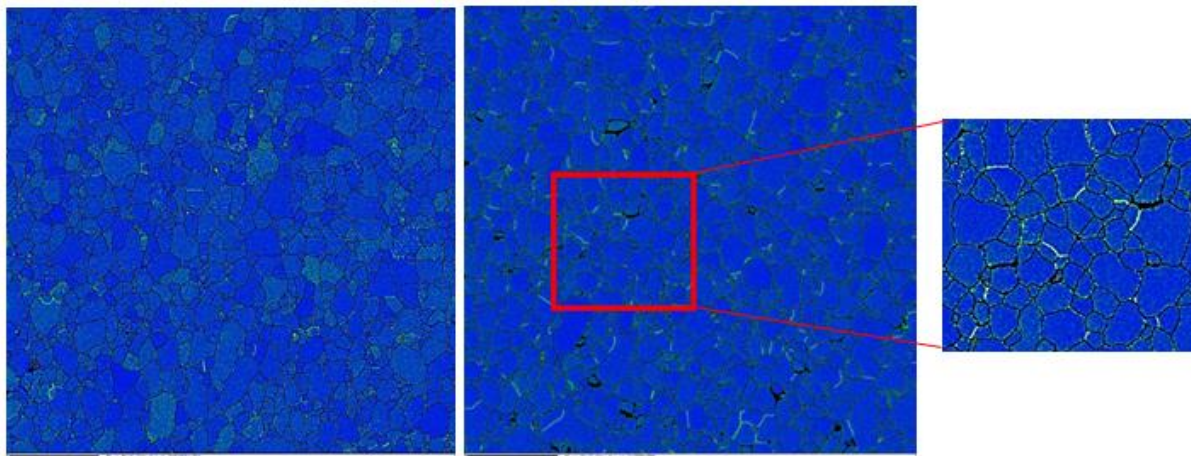
Obr. 5: Nedeformovaný vzorek Zr1Nb po 1. roce ozařování. a) Přehledový snímek mikrostruktury s rekrystalovanými zrn (STEM-BF). b) Vnitřní oblast zrna matriční fáze α -Zr s původními precipitáty sekundární fáze, nejčastěji kulovité nebo tyčinkovité morfologie. Tmavší oblasti snímku ukazují radiaci poškození – označeno šipkami (TEM-BF). c) RI precipitáty o rozměrech několika nm označeny šipkami (STEM-HAADF).



Obr. 6: Nedeformovaný vzorek Zr1Nb po 2. roce ozařování. a) Přehledový snímek mikrostruktury s rekrystalovanými zrn (TEM-BF). b) Detail rovné hranice dvou sousedních zrn s množstvím původních sekundárních precipitátů a patrným radiacním poškozením (množství dislokačních smyček), STEM-BF. c) RI precipitáty splňující difrakční podmínku (TEM-DF), stopa pro DF je vyznačena červeně. d) Detail části zrna zobrazeného v zóně [01-12] odhalující přítomnost velkého množství RI dislokací (STEM-BF). e) Precipitát sekundární fáze β -Nb (HR-TEM). Snímek dokumentuje plně krystalickou povahu částice. f) Detail zrna v orientaci, kdy jsou zobrazeny oba druhy precipitátů – velké precipitáty sekundární fáze a drobné RI precipitáty (STEM-BF).

EBSD analýza lokální misorientace

Pro analýzu mikrostruktury byla provedena rovněž EBSD analýza, která vhodně doplňuje výsledky získané z TEM z větší oblasti zájmového vzorku. V případě porovnání ozářených nedeformovaných/deformovaných vzorků ji lze využít k relativnímu vzájemnému posouzení hustoty dislokací analyzovaných vzorků, vyjádřené mírnou změnou orientace. Z obr. 7 jsou patrné oblasti zvýšené hustoty dislokací (zobrazeny v zelené barvě), které mohou být přisuzovány oblastem preferenčního projevu radiačních defektů v mikrostruktuře a nízko-úhlovým hranicím (viz obr. 7), zvýšená míra deformace je také soustředěna do oblastí hranic zrn (viz detail obr. 7). Hodnota KAM je pro referenční (neozářený) materiál a nedeformovaný materiál po 1. i 2. roce ozařování srovnatelná.



Obr. 7: Mapa misorientace nedeformovaného vzorku Zr1Nb po 1. (levý snímek) a 2. (pravý snímek) roce ozařování s použitím filtru 3x3 bodů. Oblasti s vyšší mírou deformace (vyšší hustotou dislokací) jsou zobrazeny v zelené barvě a ukazují místa projevů radiačních defektů (viz detail vzorku po 2. roce ozařování).

Závěr

Po 1. a 2. roce ozařování v aktivní zóně VVER-1000 bylo v mikrostruktuře povlakových trubek Zr1Nb pozorováno radiačně-indukované poškození, tj. zejména homogenně rozložené radiačně-indukované nano-precipitáty a dislokační smyčky $\langle a \rangle$ a $\langle c \rangle$. Amorfizace původních precipitátů sekundárních fází nebyla pozorována. Získané výsledky slouží pro objasnění příčin změn mechanických vlastností a pro porovnání mikrostruktury se vzorky po vyšším stupni ozařování.

Literatura

- [1] Gávelová, P., Halodová, P., Křivská, B., Correa, C., Krejčí, J., Ševeček, M., Rosnecký, V. (2020): *Microstructure of zirconium fuel claddings: TEM and EBSD studies of as-received and neutron-irradiated materials*. Manufacturing Technology, Vol. 20, pp. 720-727. ISSN 1213-2489
- [2] Rosnecký, V., Prokúpková, I., Halodová, P. (2020): *Metodický postup přípravy transparentních fólií pro TEM ze vzorků nestandardních rozměrů – tělesa Zr-slitin po tahové zkoušce*. Odborná zpráva, PL 3776, Centrum výzkumu Řež s.r.o.
- [3] Gávelová, P., Halodová, P., Duchoň, J., Zháňal, P., Zimina, M. (2019): *Metodiky pro mikrostrukturní analýzy*. Odborná zpráva, PL 3176, Centrum výzkumu Řež s.r.o.

VÝSLEDKY VÝVOJE A PŘÍPRAVY VÝMĚNY NÁTRUBKU ODBĚRU MĚŘENÍ TLAKU NA HLAVNÍM CIRKULAČNÍM POTRUBÍ JE TYPU VVER-1000/320

RESULTS OF DEVELOPMENT AND PREPARATION OF THE NOZZLE REPLACEMENT ON THE MAIN CIRCUIT PIPE AT NPP TYPE VVER-1000/320

Marek Palán, Petr Ducháček a Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s., Řízení kvality JE

Abstrakt

Příspěvek se zabývá přípravou výměny nátrubku odběru měření tlaku hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu JE typu VVER-1000/320 se zaměřením na konstrukčně-technologickou a materiálovou problematiku ve vazbě na specifický postup svařování metodou popouštěcí housenky. Podrobně popisuje celý proces vývoje postupu výměny nátrubku od prvotních úvah až po svařování Kontrolního svarového spoje ve smyslu NTD A.S.I. Sekce I včetně vyhodnocení souvisejících kontrol a zkoušek.

Abstract

The paper deals with the preparation of the replacement of the pressure measurement nozzle of the main circulation pipe of the primary circuit at the NPP type VVER-1000/320 with a focus on design-technological and material issues in connection with a specific welding procedure using the tempering caterpillar method. It describes in detail the whole process of developing the socket replacement procedure from the initial considerations to the welding of the Inspection welded joint in the sense of NTD A.S.I. Section I including evaluation of related inspections and tests.

Úvod

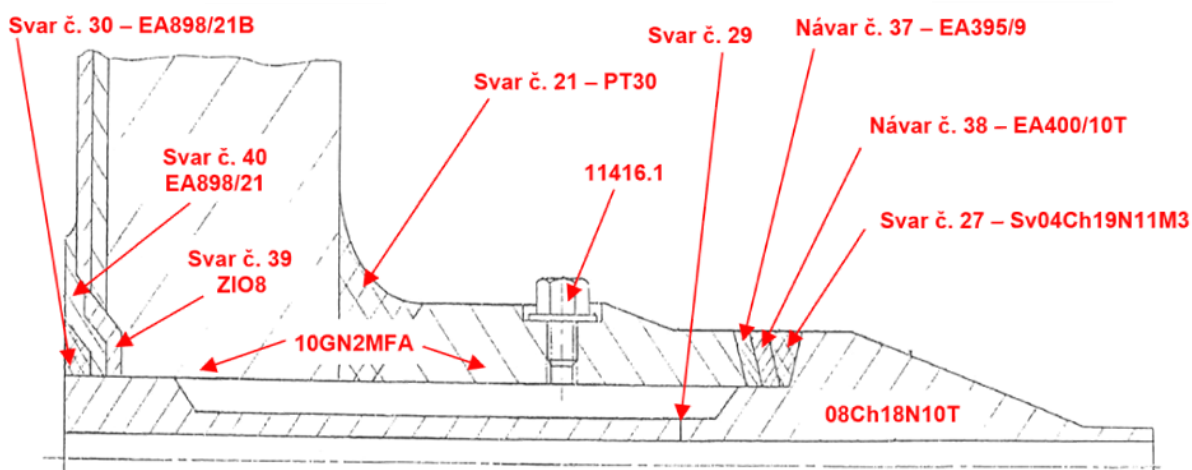
S rostoucími požadavky projektantů a konstruktérů na provozní parametry komponent a zařízení, rostou i požadavky na základní materiál. Aby bylo dosaženo materiálových vlastností, které budou vyhovovat uvažované aplikaci, jsou při výrobě základních materiálů, zejména ocelí, uplatňovány technologicky náročné metalurgické procesy. Tyto procesy zajišťují dosažení požadovaných materiálových vlastností. Pro zachování takto nabytých vlastností, musí být pro zpracování materiálu respektovány odpovídající postupy pro další technologické operace. [1]

Tato skutečnost do určité míry komplikuje provádění údržby, právě u těchto komponent a zařízení, neboť lze ve většině případů jen obtížně provést korektní tepelné zpracování svarových spojů. Obtížnost provedení tepelného zpracování souvisí především s rozměrností a tvarovou složitostí komponent a zařízení, kde se jen komplikovaně zajišťuje rovnoměrnost tepelného zpracování v celém objemu základního materiálu a hrozí tak ztráta důležitých vlastností základních materiálů, které často bezprostředně ovlivňují technickou a jadernou bezpečnost, v tomto případě při svařování. [1]

Pro podmínky údržby jsou proto neustále vyhledávány různé alternativy, které by odstranily nedostatky spojené s prováděním tepelného zpracování. Jednou z těchto alternativ je využití metody popouštěcí housenky při svařování svarových spojů z oceli 10GN2MFA. Typickým příkladem pro její praktické uplatnění je výměna nátrubku odběru měření tlaku na hlavním cirkulačním potrubí jaderné elektrárny typu VVER-1000/320. [1]

Vývoj a příprava výměny nátrubku

Předmětem výměny nátrubku odběru měření tlaku na hlavním cirkulačním potrubí je odstranění výrobní vady ve svarovém spoji č. 30 jaderné elektrárny typu VVER-1000/320, viz obr. 1. V rámci výměny nátrubku, bude provedena modifikace současného konstrukčního řešení a stávající nátrubek z oceli 10GN2MFA bude odstraněn a nahrazen novým nátrubkem z nízkouhlíkové oceli 22K. V současném konstrukčním řešení je součástí nátrubku vložka z austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T (označené podle GOST, dále jen 08Ch18N10T), která plní funkci bariéry proti korozi oceli 10GN2MFA. Modifikovaná konstrukce nátrubku s touto vložkou již nepočítá, a tato vložka bude nahrazena austenitickým korozivzdorným návarem přídatným materiálem Sv-07Ch25N13 na vnitřní válcový povrch o průměru přibližně 60 mm a tloušťce návaru minimálně 5 mm. [1]



Obr. 1: Současné konstrukční řešení nátrubku odběru měření tlaku [2]

S ohledem na rozměrnost, tvarovou složitost a další úskalí (například riziko zcitlivění austenitické výstelky provozovaného zařízení na mezikrystalovou korozi) související s provedením řádného teplotního režimu na hlavním cirkulačním potrubí, zejména tepelného zpracování po svařování, bude kvalifikován postup svařování založený na metodě popouštěcí housenky. [1]

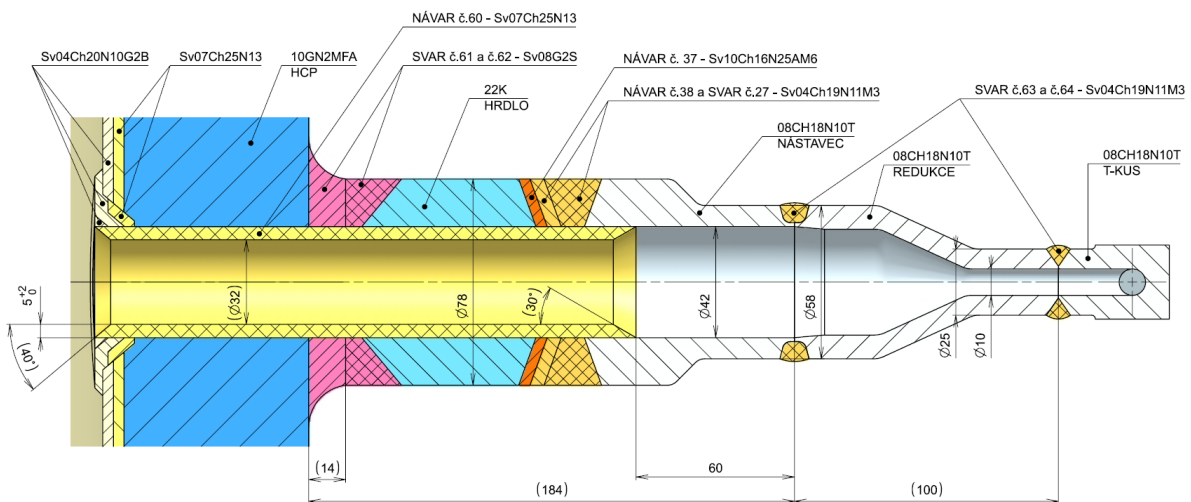
Poznámka: Předpis NP-104-18 [3] v tabulce 9.3 uvádí, že přechodné popouštění oceli 10GN2MFA pro jmenovitou tloušťku větší než 10 mm je prováděno při teplotě 620 ± 10 °C a závěrečné popouštění při teplotě 650 ± 10 °C. [1]

Na základě provedeného experimentálního programu, provedení a vyhodnocení zkušebního svarového spoje sloužícího pro kvalifikaci postupu svařování ve smyslu EN ISO 15613, respektive EN ISO 15614-1 a EN ISO 15614-7, a jako Kontrolní svarový spoj ve smyslu NTD A.S.I. Sekce I [4], bude kvalifikován postup výměny nátrubku.

Provedení kvalifikace ve výše popsaném rozsahu předchází intenzivní, téměř dvouletý, komplexní vývoj, který nesouvisí pouze s kvalifikací metody popouštěcí housenky, ale zahrnuje celou řadu dalších oborů. Úvodní myšlenky pracovaly s tezí nátrubku z austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T a umístěním heterogenního svarového spoje mezi ocelmi 10GN2MFA a 08Ch18N10T na plášti hlavního cirkulačního potrubí. [1]

Na základě provedených numerických simulací napětových stavů v oblasti heterogenního svarového spoje a jejich výsledků bylo od této varianty ustoupeno a začala být rozvíjena varianta s nátrubkem z oceli 22K. Vzhledem k omezenému přístupu z vnitřní strany hlavního cirkulačního potrubí (bez možnosti přístupu osob; přístup pouze pomocí zařízení a vybavení; úroveň nátrubku se nachází přibližně 6800 mm pod úrovní dělicí roviny víka primárního kolektoru; vnitřní průměr hlavního cirkulačního potrubí 850 mm) a uvažovaným rozměrům nátrubku, byla

zahájena příprava technologického postupu výměny nátrubku zahrnující vývoj a výrobu speciálních, jednoúčelových, zařízení, především pro obrábění a svařování. Součástí přípravy je i vývoj a odzkoušení vhodných postupů pro provedení odpovídajících nedestruktivních kontrol, zejména ultrazvukovou metodou. Důležitým aspektem je rovněž vývoj a výroba přípravků pro zajištění ochrany místa výměny nátrubku před působením vlhkosti z primárního kolektoru a vytvoření podmínek pro zajištění kvalitní ochrany ochranným plynem při svařování. V rámci přípravy je opakovaně prováděn detailní nácvik realizace výměny nátrubku včetně přípravy tří rozměrových variant nátrubku, kdy bude o konečné rozměrové variantě rozhodnuto až v průběhu výměny nátrubku na základě aktuálního stavu základního materiálu 10GN2MFA hlavního cirkulačního potrubí. Součástí výměny nátrubku je i provedení svarových spojů č. 37, 38, 27, 62, 63, 64 v uvedeném chronologickém pořadí, viz obr. 2. Předmětný návar č. 61 bude proveden před svarovým spojem č. 62, a návar č. 60 bude proveden mezi svarovými spoji č. 62 a 63. [1]



Obr. 2:: Realizované konstrukční řešení nátrubku odběru měření tlaku [5]

Vlastní navařování návarů č. 61 a 60 bude provedeno v souladu s kvalifikovanými postupy metodou svařování 141 přidavným materiálem EMK 6, respektive Sv-07Ch25N13 o průměru 0,8 mm. V průběhu svařování bude prováděna kontrola návarů metodou vizuální (přímou i nepřímou pomocí videoskopu) a po dokončení návarů a přípravě povrchů budou provedeny nedestruktivní kontroly metodou vizuální (přímá i nepřímá pomocí videoskopu), kapilární a ultrazvukovou. Ultrazvuková kontrola bude provedena technikou impulzní odrazovou za účelem kontroly přilnutí návaru. Rozsah všech nedestruktivních kontrol bude odpovídat 100 % povrchu návaru. [1]

Nátrubek a hlavní cirkulační potrubí je klasifikováno jako vybrané zařízení ve smyslu vyhlášky č. 358/2016 Sb. [6], spadající pod § 12, odst. 2), písm. a), bod 2, a zařazeno do bezpečnostní třídy 1 ve smyslu vyhlášky č. 329/2017 Sb. [7]. [1]

Návrh výměny nátrubku vychází z původních projektových požadavků definovaných v ÚP/PP, jedná se zejména o požadavky předpisů OP 1513-72 [8], PK 1514-72 [9], PNAE G-7-002-86 [10], OST 108.300.02-86 [11] nahrazující RTM 108.300.02-82 [12], a splňuje požadavky stanovené Atomovým zákonem č. 263/2016 Sb. [13] a vyhláškou č. 358/2016 Sb. [6]. Svařování a nedestruktivní kontroly budou prováděny v souladu s požadavky uvedenými v NTD A.S.I. Sekce I [4], NTD A.S.I. Sekce II [14] a NTD A.S.I. Sekce VII [15].

Závěr

V současnosti jsou dokončovány technologické zkoušky související s přípravou před zahájením vlastního svařování kvalifikace postupu svařování ve smyslu EN ISO 15613, respektive

EN ISO 15614-1 a EN ISO 15614-7, a Kontrolního svarového spoje ve smyslu NTD A.S.I. Sekce I [4]. Kompletní vývoj a příprava výměny nátrubku hlavního cirkulačního potrubí je prováděna ve spolupráci se společností ŠKODA JS a.s. Vlastní výměna uvedeného nátrubku je plánována na rok 2023.

Literatura

- [1] Palán, M. (2020): *Studium dopadu svařování metodou popouštěcí housenky na výsledky oprav v jaderných elektrárnách*. Teze disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- [2] ČEZ, a. s.: *Interní materiály ČEZ, a. s.*
- [3] NP-104-18 (2018): *Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва.
- [4] NTD A.S.I. (2020): *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce I – Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. NTD A.S.I. Sekce I – 2020, A.S.I. [Asociace strojních inženýrů], Praha.
- [5] ŠKODA JS a.s. (2020): *Nátrubek odběru tlaku*. Technický výkres, D009280, ŠKODA JS a.s., Plzeň.
- [6] Sbírka zákonů České republiky (2016): *Vyhláška č. 358/2016 Sb., o požadavcích na zajišťování kvality a technické bezpečnosti a posouzení a prověřování shody vybraných zařízení*. Sbírka zákonů České republiky. ISSN 1211-1244
- [7] Sbírka zákonů České republiky (2017): *Vyhláška č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení*. Sbírka zákonů České republiky. ISSN 1211-1244
- [8] OP 1513-72 (1975): *Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок*. Москва.
- [9] РК 1514-72 (1974): *Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок*. Москва.
- [10] ПНАЭ Г-7-002-86 (1989): *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Энергоатомиздат, Москва.
- [11] OST 108.300.02-86 (1987): *Оборудование и трубопроводы атомных электростанций. Сварка, наплавка и термическая обработка сварных соединений деталей из стали марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А*.
- [12] RTM 108.300.02-82 (1982): *Оборудование и трубопроводы атомных электростанций. Сварка, наплавка и термическая обработка сварных соединений деталей из стали марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А*.
- [13] Sbírka zákonů České republiky (2016): *Zákon č. 263/2016 Sb., Zákon atomový zákon*. Sbírka zákonů České republiky. ISSN 1211-1244
- [14] NTD A.S.I. (2020): *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce II – Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. NTD A.S.I. Sekce II – 2020, A.S.I. [Asociace strojních inženýrů], Praha.
- [15] NTD A.S.I. (2020): *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce VII – NDT kontroly*. NTD A.S.I. Sekce VII – 2020, A.S.I. [Asociace strojních inženýrů], Praha.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY VÝVOJE TECHNOLOGIE OPRAVY NÁTRUBKU PRIMÁRNÍHO POTRUBÍ

EXPERIMENTAL RESULTS OF REPAIR DEVELOPMENT OF PRIMARY CIRCUIT NOZZLE

Tomáš Soukup a Milan Vnouček

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Při svařování a navařování oceli primárního potrubí značky 10GN2MFA je vyžadováno dodržení požadavků na tepelný režim a tepelné zpracování po svaření, které při opravném svařování hlavních komponent jaderných elektráren (JE) není v některých případech možno zajistit. Opravy je zpravidla nutné řešit zvládnutím a atestováním technologie svařování metodou popouštěcí housenky. Tato technologie je v projektu VVER známa, ale není součástí technické normativní báze pro projekt. Provedlo se proto důkladné studium chování antikoročních i nízkouhlíkových návarů a ovlivněné oblasti oceli 10GN2MFA. Zkoušky byly zaměřené na moderní způsob měření a analyzování tvrdosti, ověření kritické teploty křehkosti a ověření pevnosti svarového spoje nátrubku s primárním potrubím a antikoročního návaru uvnitř nátrubku.

Abstract

It is required to comply with the heat treatment during and post welding, which cannot be performed on site due to many difficulties. It is necessary to perform the method of temper bead welding techniques. This technology is known in the project of VVER, but not standardised. Therefore deep study of stainless steel and low carbon steel cladding and HAZ of 10GN2MFA steel was performed. Testing was based on modern measurement of hardness and verification of critical temperature of impact toughness of the primary piping nozzle and cladding.

Experimentální výsledky vývoje technologie opravy nátrubku primárního potrubí

Celé primární potrubí je vyrobeno z kovaných potrubních dílů z nízkolegované oceli značky 10GN2MFA.

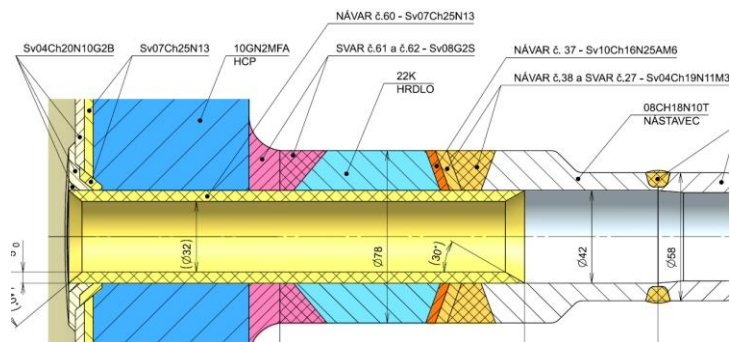
Tab. 1: Chemické složení oceli 10GN2MFA

10GN2MFA	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Hm. %	0,08 0,12	0,70 0,90	0,17 0,37	Max. 0,02	Max. 0,02	Max. 0,30	1,70 2,00	Max. 0,30	0,40 0,60	0,01 0,04

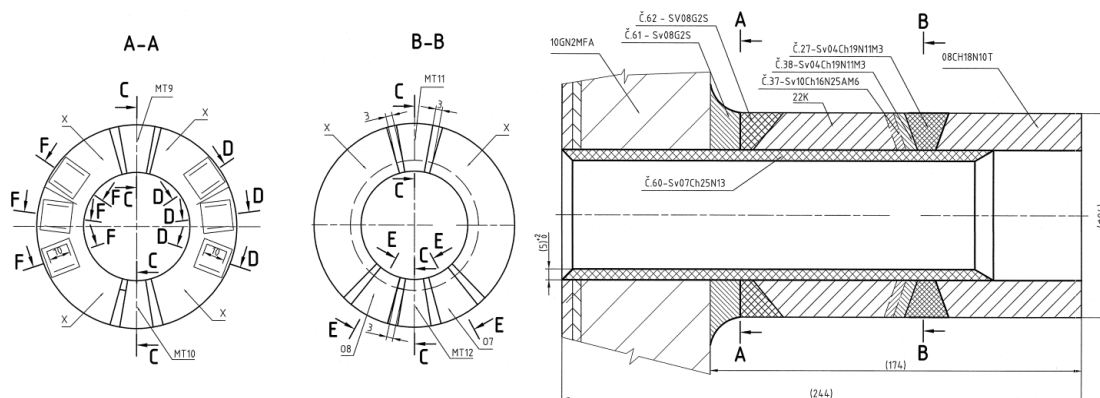
Návrh opravy je dostatečně zřejmý z obr. 1. Původní hrdlo se odřízne. Nové hrdlo s dílensky vyrobeným přechodovým heterogenním svarem se přivaří a opatří uvnitř antikoročním austenitickým návarem prováděným automatem.

Jako zkušební vzorek byl použit zbytkový prstenec původního HCP, na kterém byla simulována oprava. Na vzorcích byl proveden rozřez pro získání metalografických vzorků a polotovarů pro výrobu těles mechanických zkoušek dle zadávací dokumentace (viz obr. 2 a obr. 3).

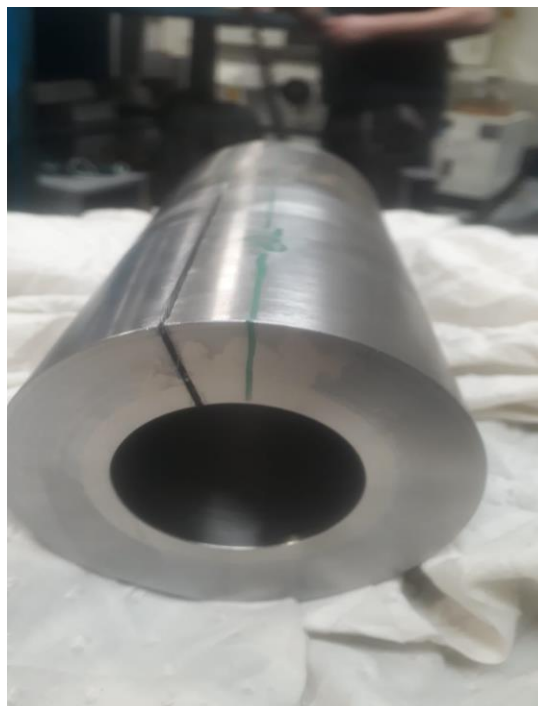
Na získaných metalografických vzorcích byla provedena dokumentace makro a zkoušky tvrdostí dle zadání. Takto získané hodnoty reprezentují pouze linie požadované zadávací dokumentací reprezentující přechody jednotlivých druhů materiálu.



Obr. 1: Řez novým hrdlem



Obr. 2: Ukázka rozřezu v zadávací dokumentaci

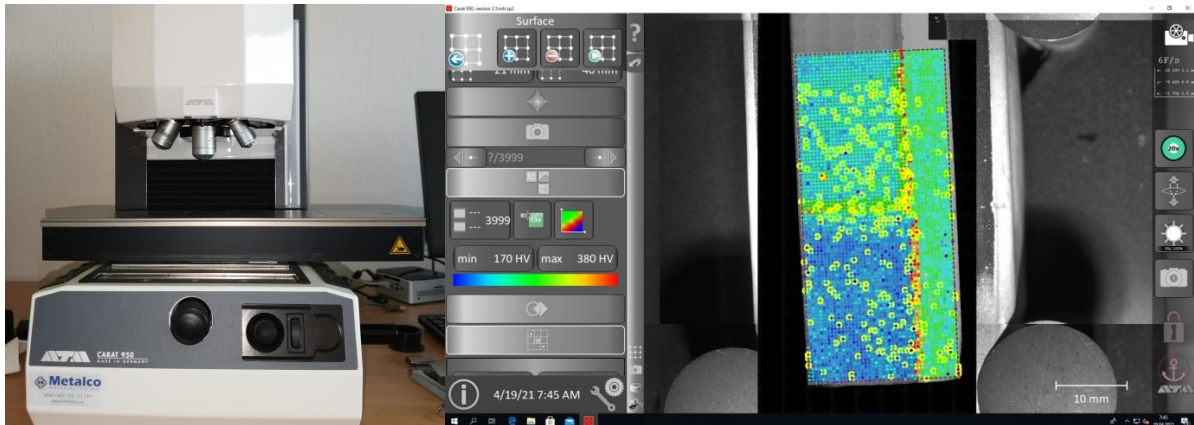


Obr. 3: Dodaný stav svařence + stav po úpravě před rozřezem

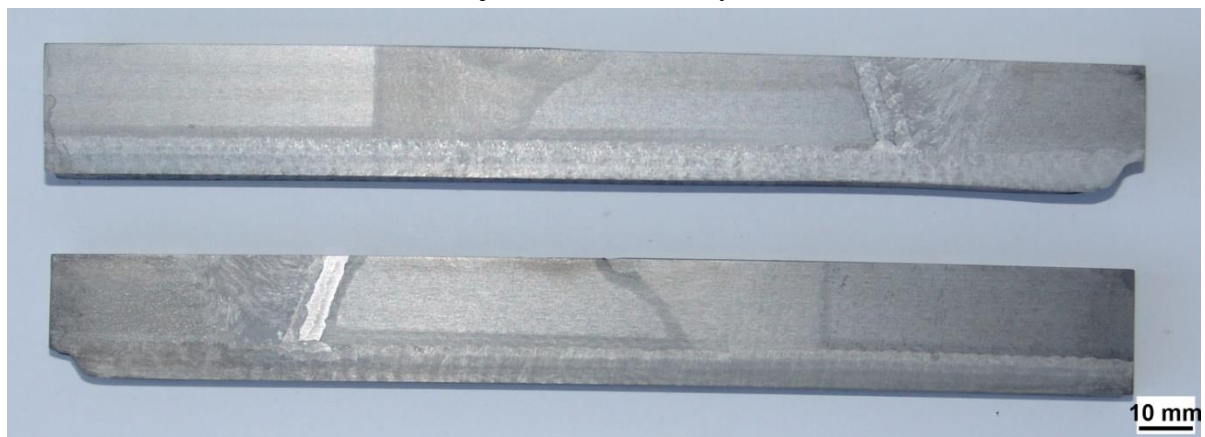
Pro analýzu tvrdosti byl použit stejný vzorek jako pro makro. Vzorek byl upraven tak, aby měl rovnoběžné strany. Díky této úpravě bylo možno provést na jedné straně metalografické pozorování a na druhé měření tvrdosti.

Pro měření jdoucí nad normativní rámec byl použit automatický tvrdoměr firmy ATM CARAT 950 umožňující měření dle metody Vickers v rozmezí zatížení 1 až 100 N. Toto zaří-

zení umožňuje vytváření souřadnicových sítí a automatické měření úhlopříček vtisku s následným zpracováním výsledných tvrdostí. Zařízení umožňuje i ruční korekci měření úhlopříček vtisku při jejich špatném vyhodnocení.

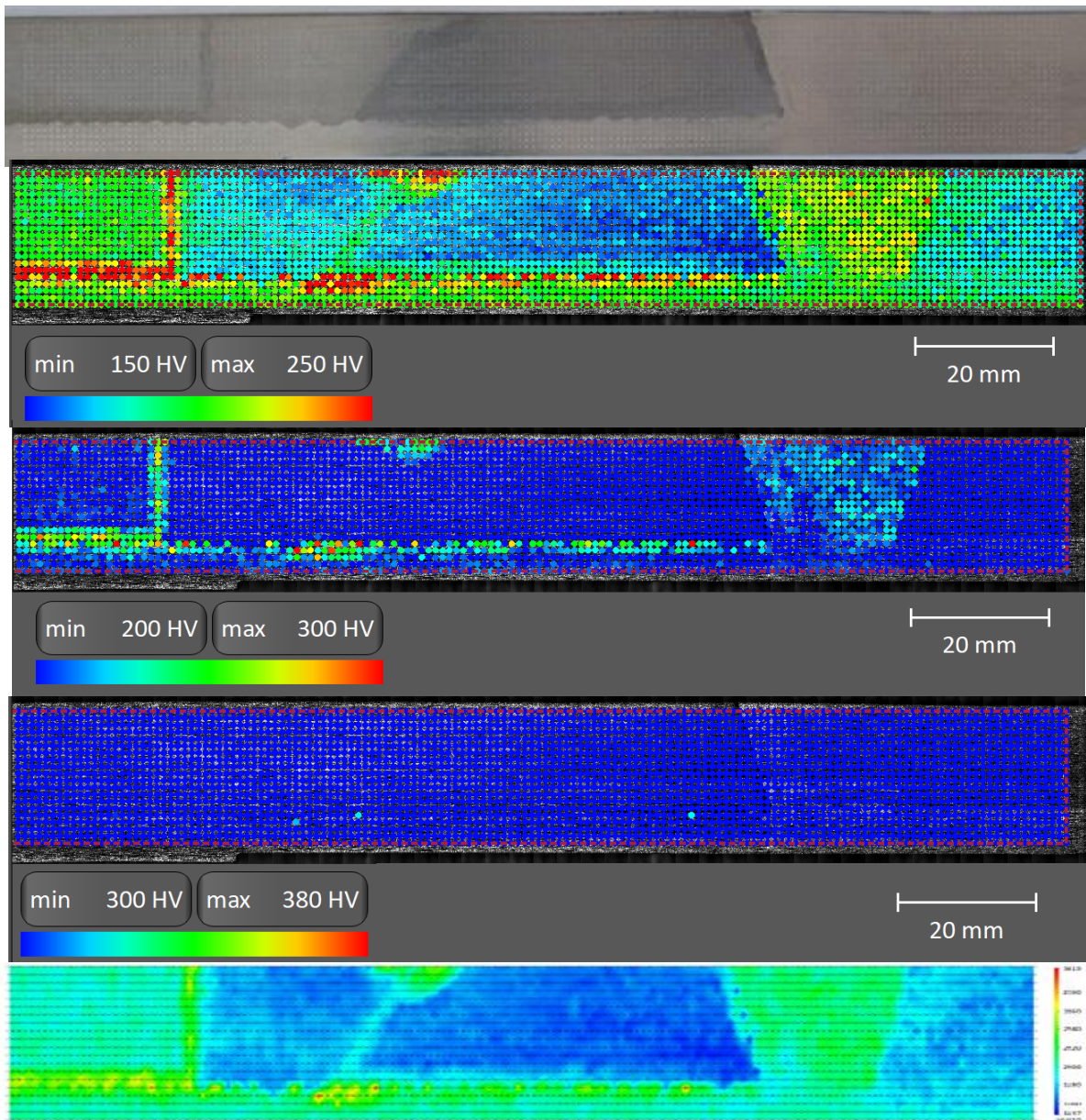


Obr. 4: Automatický tvrdoměr fy. ATM CARAT 950 s vyhodnocovacím softwarem – chybová měření jsou označena žlutým kolečkem



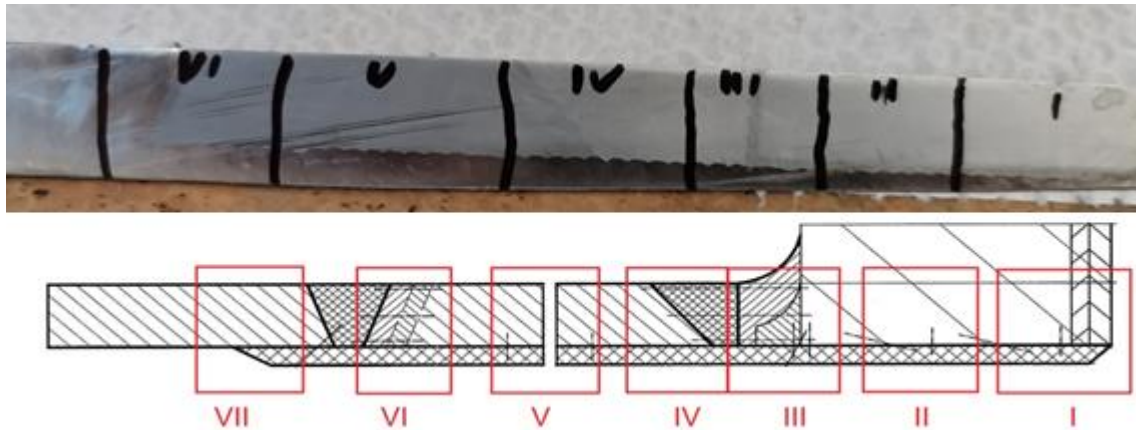
Obr. 5: Stav po naleptání makrostruktury

Jelikož se jedná o rozměrově velkou plochu pro přípravu metalografického výbrusu pro měření mikrotvrdomosti, bylo přistoupeno k měření HV10, která nevyžaduje vyleštěný povrch (viz obr. 5). Soulep na obr. 6 dokládá shodu stavu materiálu vzorku (makro) s měřením (HV10). Měření HV 10 prováděná v rastru po 1 mm je sice hrubé, ale další informace lze získat změnou rozsahu barevné škály tvrdosti. Touto změnou vyniknou detaily tvrdosti u jednotlivých materiálech. Z těchto jednotlivých škál tvrdosti lze jasně stanovit, že průměrná tvrdost vzorku není větší než 200 HV10. Rozsah 200 až 300 HV10 reprezentuje převážně oblast heterogenního spoje, nerezového návaru, návaru HCP a žíhací housenky. Hodnotu tvrdosti 300 HV10 přesahují pouze 3 měření. Dle normativu nesmí překročit hodnotu tvrdosti 380 HV10 a v žádném měřeném bodě tohoto stavu nebylo dosaženo. Jednotlivé strukturální fáze jsou pro vtisky HV10 malé a výsledná tvrdost je silně zprůměrována. Rozptyl hodnot vtisků v jednotlivých oblastech se pohybuje v jednotkách procent.



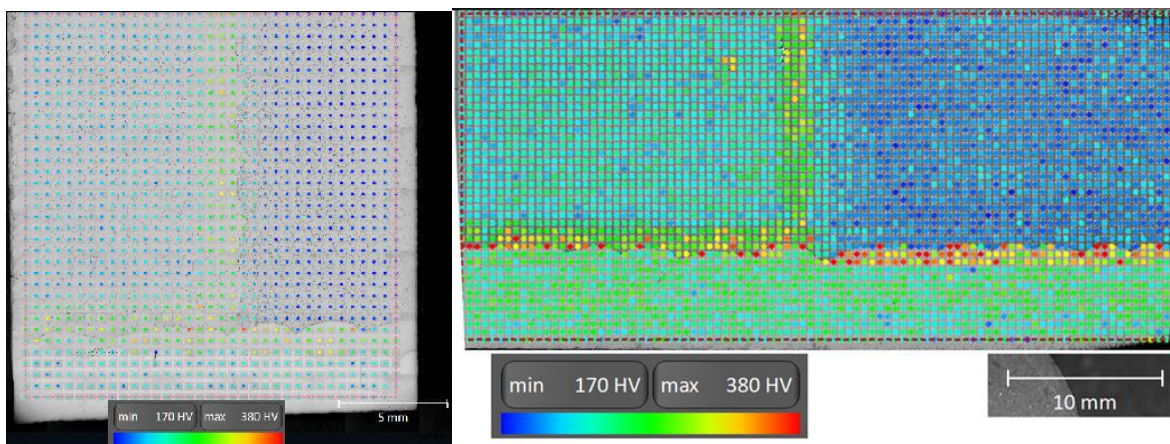
Obr. 6: Měření tvrdosti svarového spoje (HV10 160x20 po 1 mm) celkový rozsah 150 až 380 HV10 v rámci jednotlivých rozsahů + 2D mapa tvrdostí

Pro detailnější analýzu byla použita místo HV10 měření HV1 a HV0,1, která byla provedena na rozměrově menších vzorcích reprezentujících zájmové lokality vzorku. Lokality byly označeny čísly I – VII a reprezentovaly přechody mezi jednotlivými materiály svařence (viz obr. 7). Na vzorcích, kde to umožňovala velikost, nebo byl materiál pro dostatečný počet metalografických výbrusů, bylo provedeno víc druhů měření tak, aby byla daná oblast pokryta měřením HV10 až HV0,1. Zvolený postup umožnil minimalizaci rozestupu vtisků daného normou, zvýraznění strukturních regionů s vyšší tvrdostí a detailnější porovnání. Tento stav ovšem znamená, že hodnoty měření HV1 a HV0,1 budou posunuty k vyšším číslům a rozptýl hodnot se zvýší.



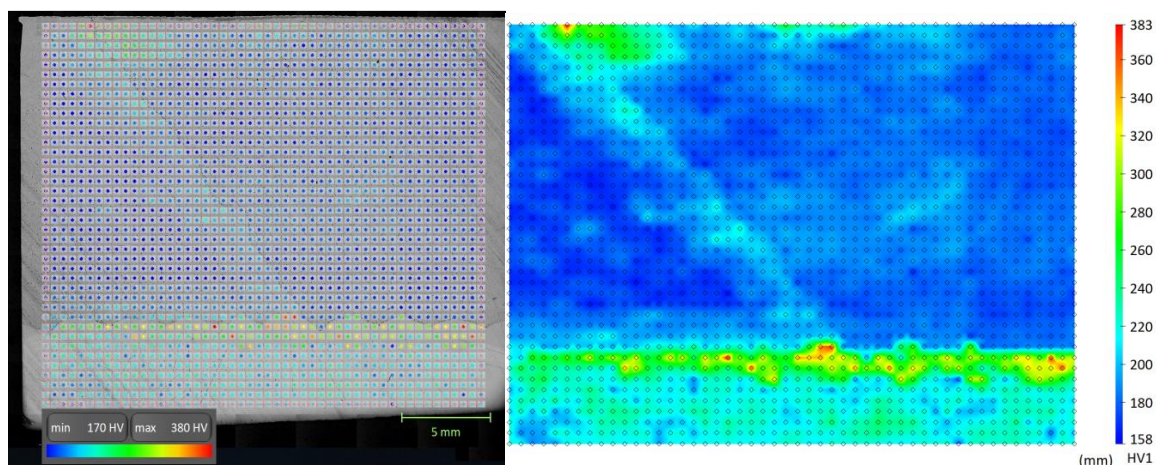
Obr. 7: Rozřez svarového spoje I – VII pro přípravu metalografických výbrusů s vyznačenými liniemi normativního měření HV10

Mezi nejzajímavější zjištěné výsledky lze uvést měření na segmentu III, IV a VI. Použitý rastr byl volen po 0,5 mm. Byly zaznamenány body přesahující hodnotu 380 HV_{0,1} – a to převážně v oblasti stavení první housenky návaru – zde netvoří výrazné ostrůvky nebo linie, ale jsou umístěny osamoceně. Okolí těchto bodů má vyšší tvrdost, než je průměr zjištěný na vzorku. Přechod mezi těmito úrovněmi tvrdosti je ostrý. Body však jasně ukazují rozšíření oblasti zvýšené tvrdosti pod materiálem HCP. Oblast zvýšené tvrdosti pod materiálem 22K je oproti oblasti pod materiálem 10GN2MFA podstatně užší s častějším výskytem vyšších hodnot. Mezi další dobře patrné jevy zachycené měřením tvrdosti jsou housenky 1/2 V svaru č. 62 a přechod mezi svary č. 61 a č. 62. Tento jev vynikne až při zpracování hodnot do 2D mapy, při analýze samotných vtisků není tak patrný.

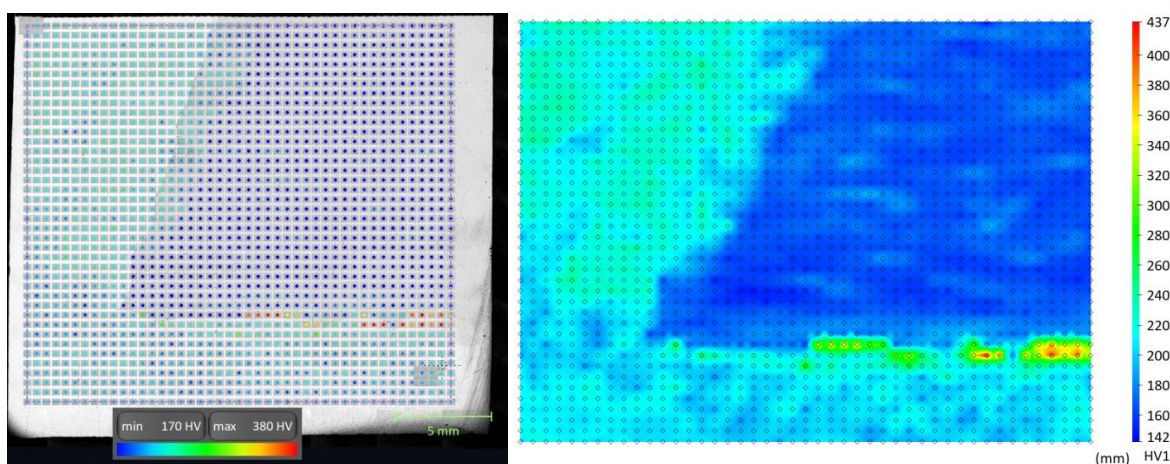


Obr. 8: Měření HV1 (vlevo) a HV_{0,1} (vpravo) na vzorku III

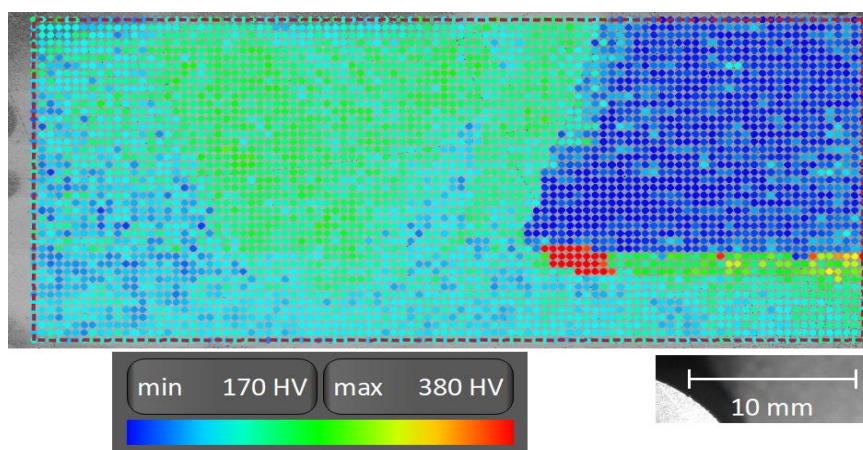
Mezi nejrozdílnější výsledky měřené na několika vzorcích patřila oblast heterogenního spoje. I zde bylo měření uskutečněno na větším počtu vzorků. Díky této skutečnosti se projevily rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Tento rozdíl je dán interakcí chemicky různorodých materiálů heterogenního spoje. Díky namíchání různých komponent svaru u jednoho vzorku vykazuje jedna z housenek podstatně vyšší tvrdost než housenky okolní. Získané průměrné tvrdosti jsou až na tuto odlišnost velmi podobné s měřeními na jiných vzorcích. Při analýze tvrdostí byl zářející ještě jeden fakt, a to nekorespondence změny tvrdosti s linií stavení. Na ostatních vzorcích obsahující linii stavení korespondovala hodnota tvrdosti (viz obr. 10) se změnou fázového a chemického složení. Tento stav je patrný na všech vzorcích s heterogenní linií svaru (viz obr. 6, obr. 10 a obr. 11) a při všech zátěžích (HV10, HV1 a HV_{0,1}) jako „nos“ ve střední podnávarové oblasti heterogenního svaru na materiálu 22K.



Obr. 9: Měření HV1 na vzorku III – IV s patrnou linií stavení a přechodu mezi svary č. 61 a č. 62 + 2D mapa



Obr. 10: Měření HV1 na vzorku VI s patrnou linií heterogenního svaru + 2D mapa tvrdosti



Obr. 11: Měření HV0,1 na vzorku VI s patrnou linií heterogenního svaru a odlišnou housenkou první linie návaru

Závěr

Měření tvrdosti na ploše vzorku poskytuje podrobnější náhled na stav základního materiálu, TOO a svarového kovu. Zpracování několika set až tisíc měření je však časově náročnou operací vyžadující co nejnižší míru chybovosti při měření jednotlivých vtisků. Získané informace jsou závislé na zvoleném rastru a velikosti zatížení s ohledem na omezení dané normou ČSN EN ISO 6507-1.

HODNOCENÍ TLAKOVĚ-TEPLOTNÍCH ŠOKŮ NA NÁTRUBEK SYSTÉMU HAVARIJNÍHO CHLAZENÍ AKTIVNÍ ZÓNY TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU

Vladislav Pištora, Miroslav Pošta a Katarína Šišková

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Jedním z nejdůležitějších aspektů pro zajištění integrity tlakové nádoby reaktoru (TNR) jaderné elektrárny (JE), je prověření odolnosti TNR proti náhlému lomu v případě nehod spojených s tlakově-teplotním šokem (PTS). V tomto příspěvku se zabýváme hodnocením integrity nátrubků systému havarijního chlazení aktivní zóny (SHCHZ) TNR. Tyto nátrubky působí jako koncentrátory napětí a současně mohou být v případě nehody typu PTS prakticky okamžitě zatíženy značným teplotním šokem.

Nejprve byl vytvořen prostorový konečněprvkový model 90° výseku nátrubkové části TNR zahrnující hodnocený nátrubek (resp. jeho symetrickou polovinu) včetně ochranné košilky s detailně modelovanou postulovanou povrchovou trhlinou. Trhlina byla postulována o hloubce odpovídající jedné čtvrtině tloušťky stěny TNR. Následně byly provedeny konečně-prvkové pevnostní výpočty pomocí softwaru SYSTUS pro nehody typu LB LOCA (Large-break Loss-of-Coolant-Accident). Vstupní data pro pevnostní výpočty zahrnují průběhy teplot chladiva a koeficientů přestupu tepla, které jsme obdrželi z výsledků systémových termohydraulických analýz realizovaných programem RELAP5.

V rámci pevnostních výpočtů byla řešena teplotní úloha, při níž byl modelován přestup tepla v hodnocené konstrukci a zjednodušeně také v mezeře mezi ochrannou košilkou a samotným nátrubkem. Potom byla řešena mechanická úloha jako úloha elasto-plasticity. Na základě pevnostních analýz byly vypočteny lomově-mechanické parametry (součinitel intenzity napětí) a zhodnocena odolnost nátrubků SHCHZ.

Výsledkem je prokázána integrita nátrubků SHCHZ TNR pro nehody typu LB LOCA pro hodnocenou JE. Lze konstatovat, že provedenými výpočty byla prokázána účinnost ochranné košilky nátrubků SHCHZ z hlediska ochrany nátrubku před teplotním šokem.

MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZY MATERIÁLU INCONEL 718 PO EXPOZICI V ULTRAKRITICKÉ VODNÍ SMYČCE A DALŠÍ VÝZKUMNÉ AKTIVITY CENTRA VÝZKUMU ŘEŽ V SCW OBLASTI

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF MATERIAL INCONEL 718 AFTER THE EXPOSURE IN THE ULTRACRITIC WATER LOOP AND OTHER RESEARCH ACTIVITIES IN THE SCW FIELD IN RESEARCH CENTER ŘEŽ

Daniela Marušáková ^{a), b)}, Rostislav Fukač ^{a)} a Claudia Aparicio ^{a)}

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

^{b)} Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6

Abstrakt

Centrum výzkumu Řež s.r.o. se dlouhodobě zabývá problematikou jaderných reaktorů IV. generace. Jedním z perspektivních konceptů pokročilých reaktorů je právě SCWR (superkritickou vodou chlazený reaktor). Příspěvek představuje část výsledků z expozic konstrukčních materiálů v superkritické vodní smyčce. Konkrétně se jedná o Inconel 718, jehož vzorky byly vystaveny superkritickým podmínkám – demineralizované vodě o teplotě 600 °C a tlaku 25 MPa, po dobu 430 hodin. K vyhodnocení mikrostruktury po expozicích v superkritické vodě byla použita skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzní spektroskopii, v kombinaci s rentgenovou difrakcí. Všechny tyto metody potvrdily růst oxidů obsahující Ni-Fe – spinel NiFe_2O_4 , oxid chromitý Cr_2O_3 v kompaktní, cca 1 μm tenké vrstvě, s lokálním nárůstem 2-5 μm . V mikrostruktuře se rovněž vyskytovaly částice NiNb_3 , které však nebyly expozicemi nijak ovlivněny,

Abstract

Research Center Řež s.r.o. has been investigating in the field of nuclear reactors of the 4th generation for a long time. One of the promising concepts of advanced reactors is SCWR (super-critical water-cooled reactor). The paper presents part of the results from the exposure of construction materials in a supercritical water loop. Specifically, it is Inconel 718, whose samples were exposed to supercritical conditions demineralized water at a temperature of 600 °C and a pressure of 25 MPa, for 430 hours. Scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy in combination with X-ray diffraction was used to evaluate the microstructure after exposure in supercritical water. All these methods confirmed the growth of Ni-Fe spinel NiFe_2O_4 , chromium oxide Cr_2O_3 , and occurrence of NiNb_3 particles on the surface of the material in a compact, approx. 1 μm thin layer, with occasional occurrence of oxides with a thickness of 2-5 μm .

Úvod

Superkritický vodou chlazený reaktor (SCWR) byl navržen jako jeden z konceptů reaktorů IV. generace (GIV), a to za účelem vyšší tepelné účinnosti při výrobě energie [1]. Tento koncept je založen na úspěšném využití superkritické vody (SCW) ve fosilních elektrárnách po více než tři desetiletí [2]. SCW označuje vodu s teplotou a tlakem nad kritickým bodem vody při 374,15 °C a 22,1 MPa. Koncept SCWR počítá, že budou konstrukční materiály vystaveny teplotám až 650 °C a tlacím až 34,5 MPa [3]. Rozdílné chemické vlastnosti SCW oproti klasické vodě a absence jakýchkoli fázových změn v tomto médiu povedou k vyšší tepelné účinnosti a zjednodušení zařízení ve srovnání se současnými lehkovo-vodními reaktory (LWR) [1]. Inconel 718 (Ni-19Cr-18Fe-5Nb-3Mo) je jedním z kandidátských materiálů pro výrobu palivových tyčí či dalších konstrukčních součástí pro GIV. Tento materiál byl úspěšně využit

v leteckém, chemickém a jaderném průmyslu díky dobré kombinaci vysokoteplotní pevnosti a odolnosti proti korozi / oxidaci [4].

Experimentální část

Dva ploché vzorky z materiálu IN 718 byly vyrobeny o rozměrech $2 \times 15 \times 40$ mm. Chemické složení materiálu je uvedeno v tab. 1. Povrch analyzované plochy byl před expozicí upraven brusným papírem o zrnitosti 500 μm , následně byly vzorky vyčištěny ultrazvukem, vysušeny a zváženy.

Tab. 1: Chemické složení IN 718 [Wt%]

Materiál	Cr	Fe	Ni	Ti	C	Al	Nb	Mo
IN718	18,9	17,1	49,7	1,1	4,6	0,8	4,8	3,0

Poté byly vzorky vystaveny superkritické vodě, v ultrakritické vodní smyčce (UCWL) po dobu 430 hodin. Expoziční medium byla demineralizovaná voda o parametrech znázorněných v tab. 2.

Tab. 2: Parametry superkritické vody v UCWL

Doba expozice [hod.]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Tlak [MPa]	pH	Fe [$\mu\text{g/l}$]	TOC [$\mu\text{g/l}$]
430	600	25	6,8 až 4,4	<50 až 149	181 až 2286

Po expozici v UCWL byly vzorky znovu zváženy na analytických vahách s přesností 0,00001 g. Analytické metody využití k vyhodnocení mikrostruktury před a po expozici (na povrchu vzorku a v příčném řezu na metalografickém výbrusu) byly skenovací mikroskop SEM TESCAN Lyra3 GMU vybavený autoemisní katodou (FEG), v režimu zobrazení pomocí sekundárních elektronů (SE) a zpětně odražených elektronů (BSE). Mikroskop je vybaven energiově disperzním detektorem (EDS) k určení chemické analýzy.

Povrch vzorku IN 718 byl následně analyzován pomocí rentgenové difrakce (XRD) v grazing-incidence (GI) geometrii. Měření bylo provedeno s využitím difraktometru Empyrean 3. generace (Malvern-PANalytical), který je vybaven zdroji Co- $K\alpha$ záření (RTG vlnová délka 0,1789 nm, 40 kV, 40 mA), fokusujícím zrcadlem pro Co-záření, 5-os Eulerovou kolébkou, a detektorem PIXcel3D (1D mode. Dopadající úhel omega (ω) byl zafixován na 1° během měření, rozsah měření difrakčních úhlů (2θ) byl od 20° do 100° s krokem $0,026^{\circ}$. Identifikace krystalických fázi byla provedena s využitím softwaru HighScore+ (PANalytical, verze 4.8) obsahující databázi PDF-4+ 2020.

Výsledky měření byly porovnány s předchozí expozicí IN 718 v superkritické vodní smyčce (SCWL), při stejném chemickém režimu a tlaku 25 MPa, ale nižší teplotě 395°C a delší době expozice 1000 hodin [5].

Výsledky a diskuze

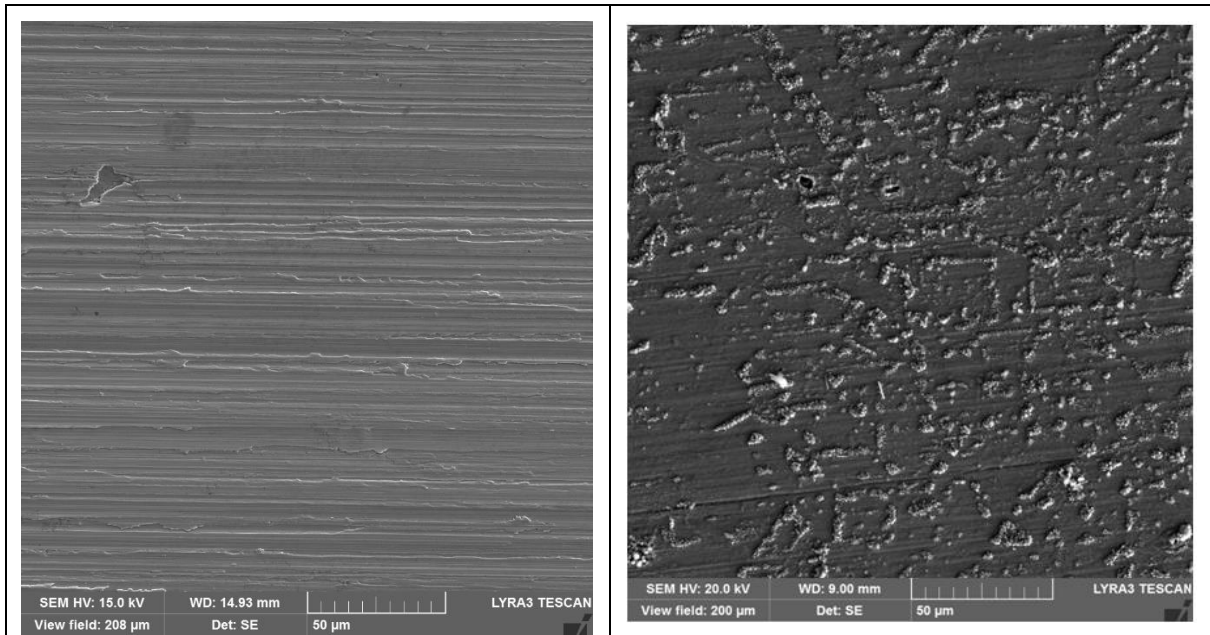
Vzorky byly zváženy před a po expozici v UCWL. Hodnoty z měření jsou uvedeny v tab. 3. Hmotnostní příbytek po expozici v SCWL za nižší teploty byl 0,00017 a 0,00021 [5].

Tab. 3: Hmotnostní příbytek po expozici v UCWL

Vzorek	Hmotnost [g] před expozicí	Hmotnost [g] po expozici	Hmotnostní příbytek [g]
I5	6,83512	6,83627	+0,00115
I6	6,81945	6,82058	+0,00113

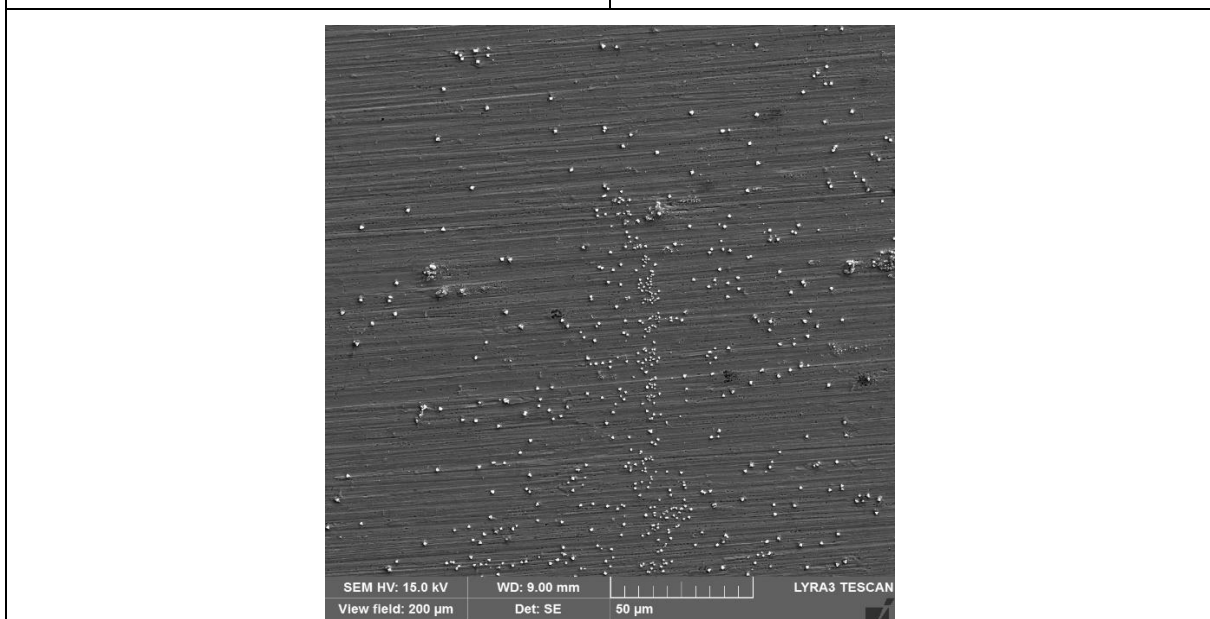
Povrch vzorků byl zdokumentován pomocí SEM (obr. 1 až obr. 3) včetně využití detektoru EDS určující chemické složení. Na obr. 1. je znázorněn povrch IN 718 ve výchozím stavu a na obr. 2 pak povrch po expozici v UCWL. Obr. 3 ukazuje povrch po expozici v SCWL při nižší

teplotě [5]. Porovnáním všech stavů je patrný nárůst krystalů, který byl nejvýraznější u vzorku po expozici v UCWL a tedy teplotě 600 °C, obr. 2.



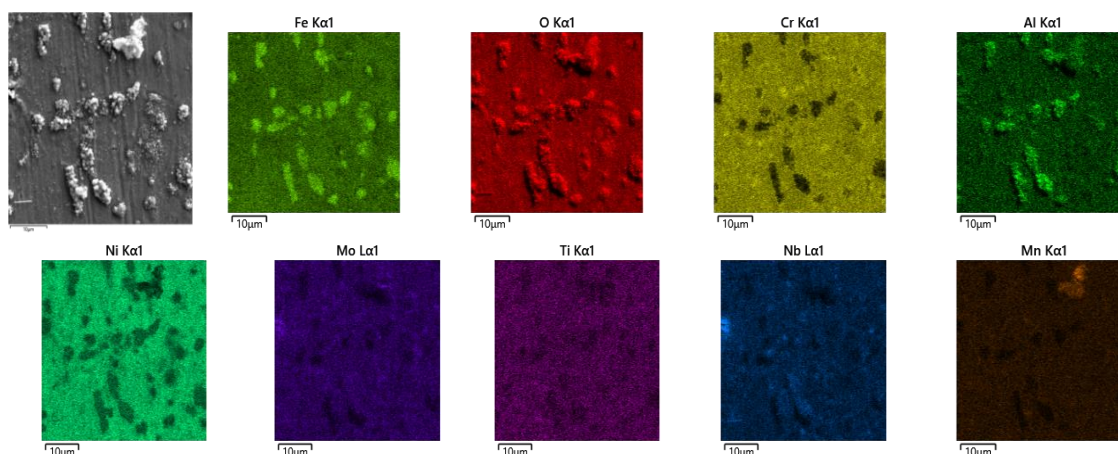
Obr. 1: Povrch IN 718, výchozí stav. MAG 1.33kx.

Obr. 2: Povrch IN 718, po SCW expozici. MAG 1.38kx.

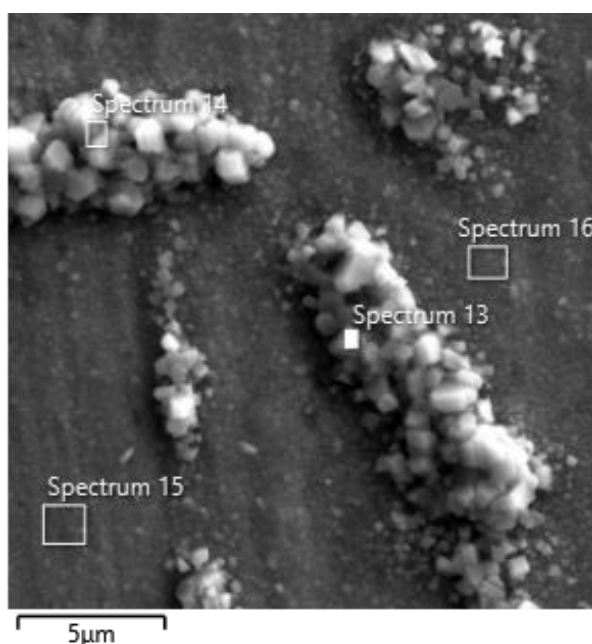


Obr. 3: Povrch IN 718, po SCW expozici 395 °C / 25 MPa / 1000 hod. MAG 1.38kx [5]

Elementární chemické mapování a bodová analýza pomocí EDS jsou na obr. 4 a obr. 5, a kvantitativní chemické složení z bodové analýzy je v tab. 4. Krystaly na povrchu IN 718 sestávají převážně z kyslíku, železa, niklu a chromu, což je rozdíl oproti předchozí expozici v SCWL, kde převažoval kyslík s hliníkem a chromem.



Obr. 4: Chemické mapování na povrchu materiálu IN 718 po expozici v UCWL



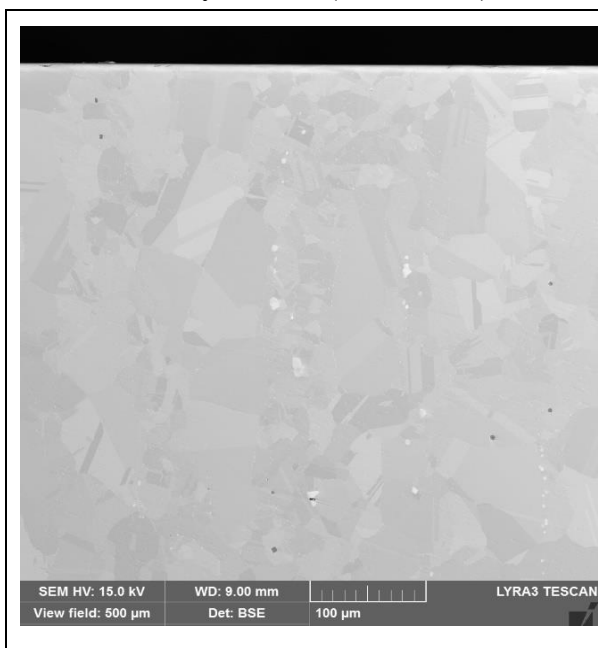
Obr. 5: Bodová analýza na povrchu IN 718 po expozici v UCWL

Tab. 4: Bodová analýza - chemické složení [Wt% Sigma 0.1-0.7] na povrchu IN 718 po expozici v UCWL

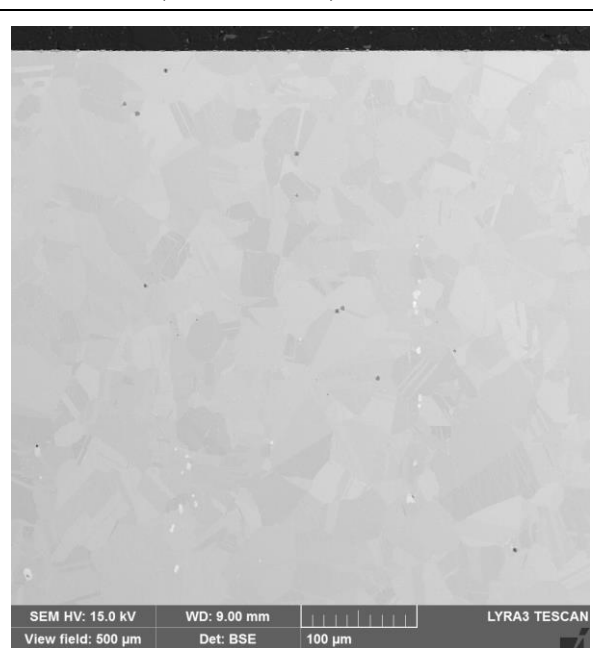
Oblast měření	Prvek	Fe	Ni	O	Cr	Al	Nb	Ti	Mo
Spectrum 13		34,55	23,14	27,19	7,25	2,84	3,38	0,43	0,94
Spectrum 14		30,84	26,59	29,21	3,32	4,83	4,17	0,39	-
Spectrum 15		15,11	43,81	16,08	17,02	0,93	3,85	0,99	1,91
Spectrum 16		13,72	45,54	16,84	17,06	1,14	2,35	1,07	1,81

Příčný řez vzorku je zobrazen v modu BSE na obr. 6 až obr. 10, kde je výchozí stav mikrostruktury na obr. 6 a obr. 8. Po expozici v UCWL, obr. 7, obr. 9, obr. 10 je patrná nově vzniklá tenká povrchová vrstva, která lokálně dosahuje tloušťky až 5 μm. Na obr. 11 je k porovnání příčný řez vzorku po expozici v SCWL za nižší teploty, kde není patrna žádná povrchová vrstva.

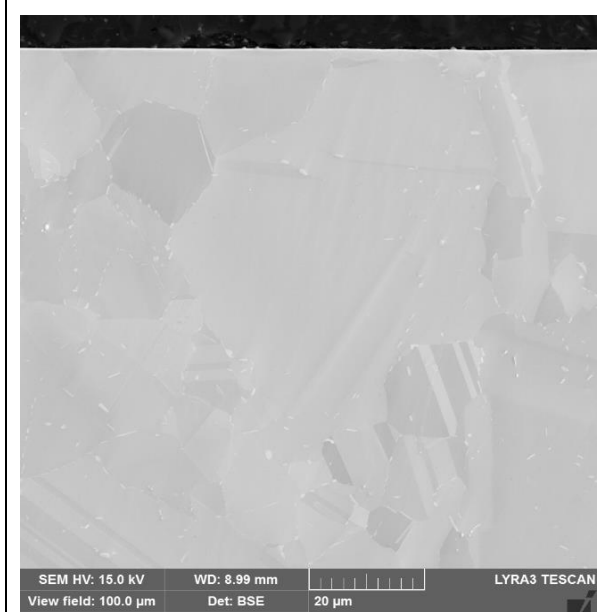
V mikrostruktuře materiálu jsou přítomna dvojčata a také sekundární fáze bohaté na nikl s niobem a molybdenem (bílé částice) nebo titan s uhlíkem (černé částice).



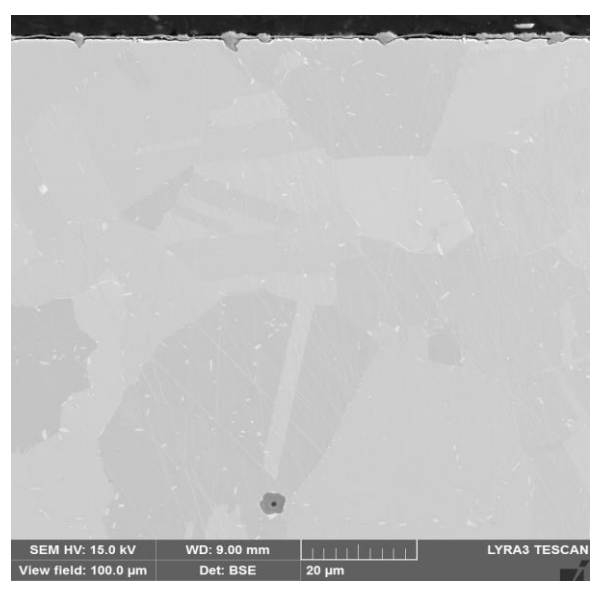
Obr. 6: Příčný řez IN 718, výchozí stav.
Leptáno pomocí OPS. MAG 554x.



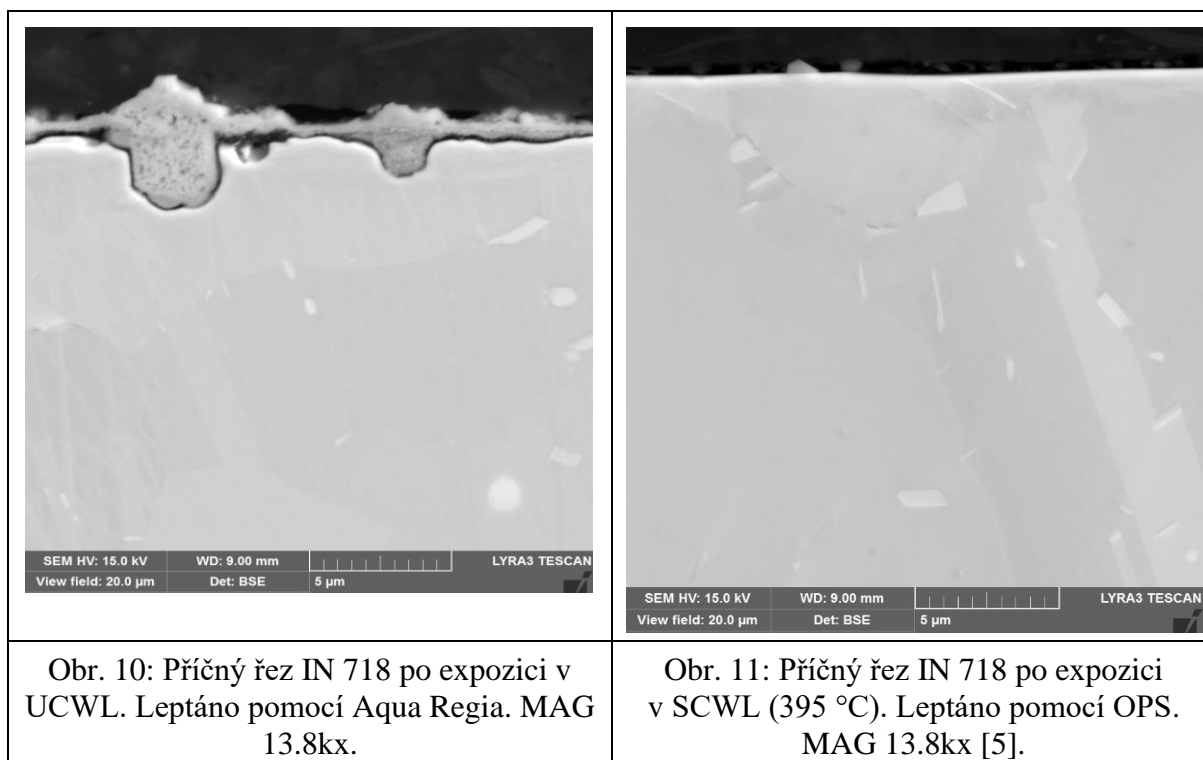
Obr. 7: Příčný řez IN 718 po expozici
v UCWL. Leptáno pomocí Aqua Regia.
MAG 554x.



Obr. 8: Příčný řez IN 718, výchozí stav.
Leptáno pomocí OPS. MAG 2.77kx.



Obr. 9: Příčný řez IN 718 po expozici
v UCWL. Leptáno pomocí Aqua Regia.
MAG 2.77kx.

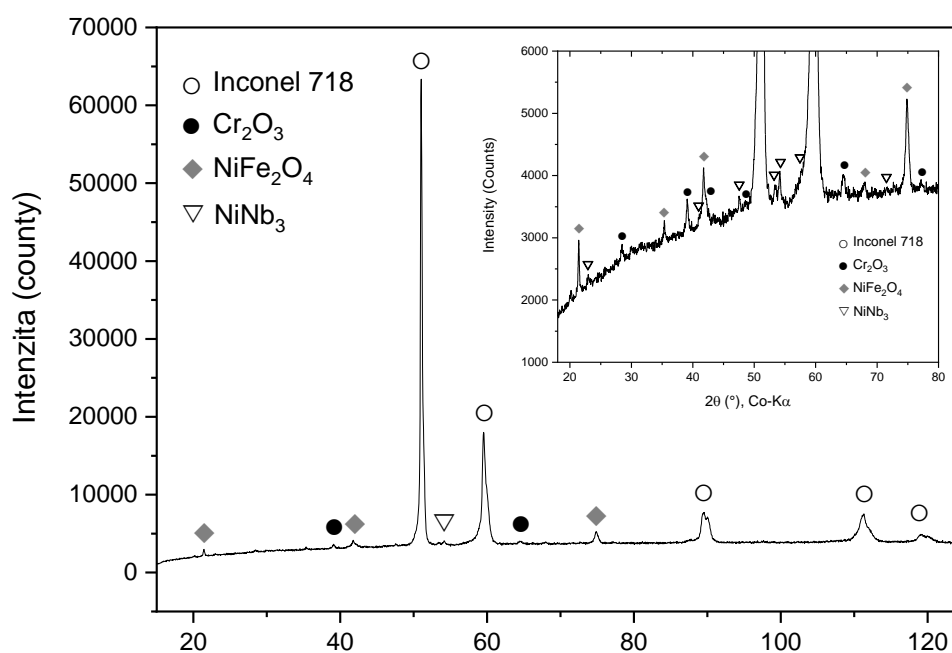


Obr. 10: Příčný řez IN 718 po expozici v UCWL. Leptáno pomocí Aqua Regia. MAG 13.8kx.

Obr. 11: Příčný řez IN 718 po expozici v SCWL (395 °C). Leptáno pomocí OPS. MAG 13.8kx [5].

K identifikování fází v krystalech na povrchu materiálu po expozici v UCWL byla použita metoda XRD. Hlavní píky v difrakčním záznamu, obr. 12, patří k původní feritické fázi Inconelu, ale ve vyšších úhlech ($2\theta \sim 89,5^\circ; 111,5^\circ; 119,5^\circ$) je pozorováno štěpení píků, což může znamenat přítomnost druhé feritické fáze s menší základní buňkou. Po přiblížení jsou patrné další píky fází, identifikovaných jako oxid chromitý Cr_2O_3 , Ni-Fe spinel NiFe_2O_4 , a částice NiNb_3 .

Pro porovnání, u materiálu exponovaném v SCWL za nižší teploty byly fáze identifikované na povrchu materiálu odlišné, a to s převažujícími oxidy chromu a hliníku – hercynit / chromit $\text{Fe}(\text{Al,Cr})_2\text{O}_4$ a oxid chromičitý Cr_2O_3 [5].



Obr. 12: XRD difrakční záznam s identifikovanými fázemi na povrchu vzorku IN 718 po expozici v UCWL

Závěr

Mikrostrukturální vyhodnocení materiálu IN 718 po expozici v UCWL (demineralizovaná voda, 600 °C / 25 MPa/430 hod) bylo provedeno pomocí SEM-EDS a XRD. Kombinace těchto metod potvrdila růst oxidů Ni-Fe spinel NiFe_2O_4 , oxid chromitý Cr_2O_3 , a výskyt částic NiNb_3 na povrchu materiálu. Vzniklé oxidy tvoří kompaktní, cca 1 μm tenkou vrstvu s lokálním nárůstem až 5 μm . V porovnání s předchozí expozicí v SCWL (stejný chemický režim, 395 °C / 25 MPa / 1000 hod.), kde nebyla patrna žádná povrchová vrstva, pouze jednotlivé krystaly oxidů hercynitu a chromitu, $\text{Fe}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$, tak došlo k výrazné změně ve složení a tvaru oxidů na povrchu IN 718.

V mikrostruktuře uvnitř materiálu nedošlo k žádné významné změně. Hmotnostní přírůstek vzorků byl 0,00113 až 0,00115 g, což je spojeno s růstem oxidů na povrchu materiálu.

Poděkování

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

Literatura

- [1] US DOE Nuclear (2002): *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum [online]. Available at: <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf>
- [2] Wright, I.G., Pint, B.A. (2002): An assessment of the high-temperature oxidation behavior of Fe–Cr steels in water vapor and steam. *Proceedings of NACE Corrosion*, Denver, CO, paper NACE-02377.
- [3] Masuyama, F. (2001): *History of power plants and progress in heat resistant steels*. ISIJ International, 41, pp. 612-625. ISSN 1347-5460
- [4] Sims, C.T., Stoloff, N.S., Hagel, W.C. (1987): *Superalloys II*. Wiley-Interscience, New York. ISBN 978-0-471-01147-7
- [5] Marušáková, D., Aparicio, C., Fukač, R. (2020): *Microstructural evaluation of nickel based alloy Inconel 718 after exposure in SCWL*. *Jaderná energie*, 66, pp. 77-81. ISSN 2694-9024

STUDIE ODHADU CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ OCELI PRO ENERGETICKÁ ZAŘÍZENÍ

CREEP DAMAGE ASSESSMENT STUDY OF STEELS FOR ENERGY FACILITIES

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)} DAKEL – středisko technické diagnostiky ZD Rpety

Abstrakt

Pro zajištění dlouhodobého bezpečného používání ocelí odolných proti tečení při zvýšených provozních teplotách jsou naprosto nezbytné základní studie jejich pevnosti při tečení a hodnocení degradace. Přestože dosud chybí systematicky získávané spolehlivé údaje o creepovém chování těchto ocelí v provozu, existují způsoby hodnocení pevnosti při tečení a degradace využívající různé druhy diagnostických technik umožňující vysoce přesné metody předpovídání žárovevního chování. Tento příspěvek se zabývá jedním z nich, a to konkrétně zkoumáním chování při tečení a vývoje poškození žárovevných parovodních ocelí s různým stupněm degradace s využitím pokročilé detekční metody akustické emise (AE).

Abstract

To ensure the long-term safe use of creep-resistant steels at elevated operating temperatures, basic creep strength studies and degradation assessments are essential. Although there is still a lack of systematically obtained reliable data on the creep behaviour of these steels in operation, there are methods for assessing creep and degradation strength using various types of diagnostic techniques to allow highly accurate methods of predicting creep-resisting behaviour. This paper deals with one of them, namely the investigation of creep behaviour and the development of damage of the operated steam pipeline steel various degrees of degradation using an advanced acoustic emission detection method.

Úvod

Pro součásti tlakových systémů tepelných energetických zařízení pracujících do 580 °C se zpravidla používají nízkolegované oceli typu CrMoV. V České republice byla v minulosti používána pro konstrukce většiny energetických bloků nízkolegovaná ocel 15 128 dle ČSN 41 5128 [1]. Spolu s výstavbou nových bloků elektráren na fosilní paliva se zvýšenou účinností však vyvstal i požadavek na vývoj nových ocelí dosahujících vyšší korozní odolnost a žárovevnost za zvýšených teplot dosahujících až 600 °C. Zde nastupují 9-12% chromové oceli a hlavním představitelem těchto ocelí byla ocel nové generace P91 [2]. Tato ocel s přísadkou niobu, vanadu a dusíku zvýšila hodnotu creepové pevnosti na téměř dvojnásobek. Karbidická fáze $M_{23}C_6$ zpomaluje růst zrn, sekundární MX fáze blokuje dislokace uvnitř zrn. V dalších letech byla vyvinuta v Japonsku ocel P92. V porovnání s ocelí P91 obsahuje ocel P92 wolfram (do 2 %), méně molybdenu (do 0,6 %) a také malé množství bóru. Ocel P92 dosahuje přibližně o 30 % vyšší creepovou pevnost při 600 °C než ocel P91 [3].

Při provozu součástí dochází s postupem času k degradaci (snižování) jejich užitných vlastností a tím ke snižování jejich životnosti. Významným degradačním procesem v žárovevných ocelích, porušujícím integritu dané součásti při vysokých teplotách, je creep (tečení) materiálu. Spolu s creepem působí také koroze (vysokoteplotní oxidace) materiálu, nestabilita struktury, vysokoteplotní popouštění křehkosti oceli, aj. Naléhavým problémem parovodního potrubí, vyrobeného z těchto ocelí odolných proti tečení, je určení jejich zbytkové životnosti, už vzhledem

k tomu, že tyto části jsou nyní ve většině českých elektráren na konci své projektované životnosti ($2,5 \cdot 10^5$ hodin). Schopnost včas monitorovat a vyhodnocovat vývoj a stav porušení je zásadní požadavek pro bezpečný a dlouhodobý provoz energetických zařízení. Dosavadní metody kontroly stavu degradace materiálu zahrnovaly především mikrostrukturní rozbor a mechanické zkoušky z odebraných replik potrubí, což představuje invazivní a opakovaný zásah do materiálu komponenty.

Jednou z rychle se rozvíjejících a nadějných metod, zařazených do skupiny nedestruktivních defektoskopických zkoušek, je technika snímání tzv. akustické emise (AE) [4]. Tato metoda je vhodná pro snímání velkých částí energetických zařízení, s cílem predikovat a identifikovat poruchy dříve, než dojde k nehodě parovodních systémů fosilních energetických zařízení.

Příspěvek přináší současné poznatky při řešení výše uvedené problematiky v rámci projektu TAČR a rovněž navazuje na projekt NCK Strojírnoství.

Experimentální materiál a zkušební podmínky

Jako experimentální materiály byly zvoleny nízkolegovaná CrMoV ocel 15 128, která tvoří v současnosti hlavní součást parovodních potrubí v elektrárenských zařízení, a 9% chromová ocel P92, která má potenciál v budoucnu nahradit tyto stávající dosluhující oceli.

Ocel 15 128 byla testována různých strukturních stavech:

1. výchozí neprovozovaný segment rovné části parovodní trubky 15 128.5 o rozměrech OD 243 x 20 mm (označeno dále VS),
2. provozovaná (540 °C / 240 066 h / 17,46 MPa) ocel 15 128.9 o rozměrech OD 324 x 48:
 - tažená část ohybu s povrchovými creepovými trhlinami (označeno dále DST),
 - tlačaná část ohybu s povrchovými creepovými kavitami (označeno dále DSK).

Ocel P92 byla dodána jako část potrubí o rozměrech OD 330 x 55 mm, normalizována při teplotě 1050 °C / 30 min / vzduch a dále popouštěna při teplotě 765 °C / 60 min / vzduch. Tento stav je dále označován jako výchozí (VSP) stav. Pro simulaci tepelného zpracování materiálu standardně aplikovaného po svaření potrubí, byla část VSP stavu přidavně popouštěna při teplotě 766 °C / 3 h / do 425 °C v uzavřené peci, poté na vzduch (dále ŽS stav).

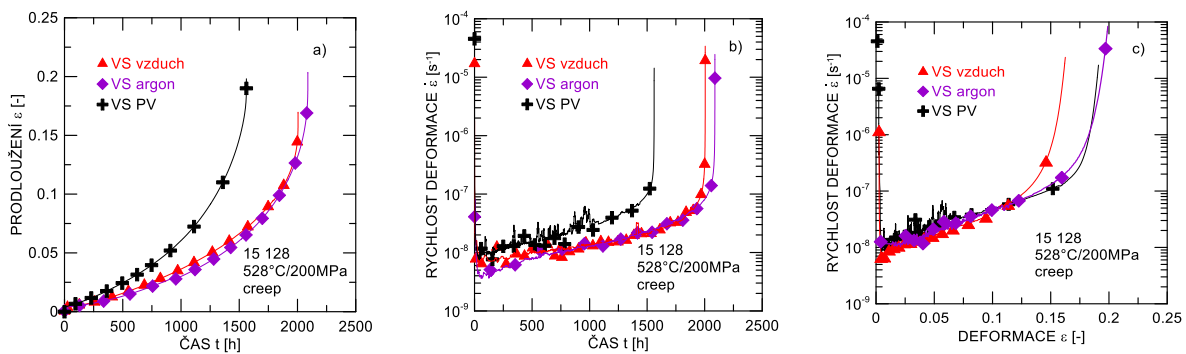
Z obou materiálů byly následně připraveny válcové creepové vzorky o průměru 5 mm a měrné délce 50 mm. Creepové zkoušky, vedené při aplikaci jednoosého tahu s konstantním zatížením, byly provedeny v ÚFM AV ČR, v.v.i. Brno, při teplotě 528 °C (ocel 15 128) a 600 °C (ocel P92) v rozsahu napětí 100-250 MPa. Všechny zkoušky byly vedeny do lomu vzorku, jednak v režimu ochranné atmosféry argonu, tak pro porovnání i na vzduchu (pouze u 15 128). V průběhu zkoušky bylo průběžně snímáno prodloužení a creepová rychlost. Mikrostrukturní analýza byla provedena pomocí skenovacího mikroskopu Tescan Lyra 3 XMU FEG/SEM-FIB/EBSD a transmisního elektronového mikroskopu Jeol 2100F (TEM).

Akustická emise byla průběžně monitorována během creepových testů pomocí funkčního prototypu aparatury IPL-3 (18 bit / 15 MHz) pro sběr dat, vyvinutého společností DAKEL, se vzorkovací frekvencí 15 MHz a celkovým zesílením 130 dB, umožňující 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 tahové soustavy sloužící jako finální výstupy obou vlnovodů. Bližší podrobnosti lze najít v [5].

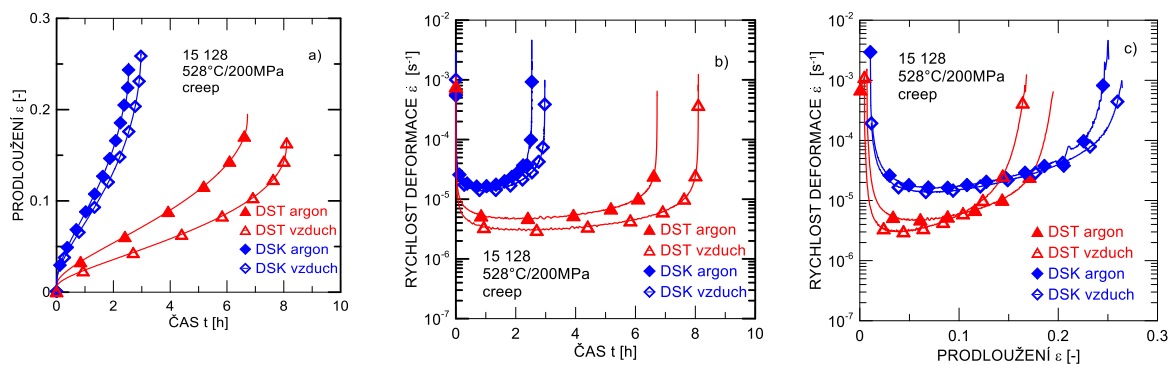
Výsledky a diskuze

Creepové zkoušky a mikrostrukturní analýza

Obrázky 1(a) a 2(a) znázorňují standardní creepové křivky pro různé provozní modifikace oceli 15 128, testované při teplotě 528 °C a napětí 200 MPa. Výsledky ukazují, že při stejných podmínkách testování vykazuje DS stav výrazně horší creepovou odolnost v porovnání s VS stavem. Z porovnání obou DS stavů vykazuje nižší creepovou odolnost DST stav. Dále, dlouhodobý provoz nemá za stanovených podmínek prakticky žádný vliv na výsledné creepové lomové prodloužení creepových vzorků. Creepové testy provedené v minulosti v UJP Praha a.s. na vzduchu odhalily, že v průběhu creepu dochází k silné oxidaci materiálu a vytvoření oxidické vrstvy, která se následně odlupuje a dochází tak k úbytku materiálu a tím i k redukci průřezu vzorku. Tato okolnost může významně ovlivnit výsledné creepové charakteristiky. Při studiu vlivu okolní atmosféry (argon vs. vzduch) na průběh creepu bylo prokázáno, že VS vzorek testovaný v argonu dosahuje nepatrně lepší creepové odolnosti. Vyšší creepovou odolnost DS stavu na vzduchu nelze v tomto případě brát vážně vzhledem k tomu, že výsledný čas do lomu je příliš krátký k oxidaci vzorku. Lepší přehled o individuálních stavech creepu nám poskytuje transformace standardních křivek do formy okamžité rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ na čase t (obr. 1(b) a obr. 2(b)) nebo okamžité rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ na creepové deformaci ϵ (obr. 1(c) a obr. 2(c)). Zde vidíme, že creepová rychlost VS stavu je přibližně o tři řády nižší než u DS stavu. Z uvedených závislostí je zřejmé, že u VS stavu po počátečním krátkém zpevnění charakterizovaném primárním stadiem creepu zvolna dochází k odpevnění v podobě terciárního stadia. Toto stadium zde představuje dominantní část celé creepové expozice. Sekundární stadium se zde téměř nevyskytuje a je zúženo na určitý inflexní bod. Zcela jiný charakter vidíme u DS stavu, kde primární fáze creepu reprezentuje přibližně třetinu celé creepové expozice. V úplném závěru dochází k akceleraci creepové rychlosti a závěrečnému lomu.



Obr. 1: Creepové charakteristiky VS stavu materiálu 15128 při napětí 200 MPa a teplotě 528 °C: (a) creepová deformace vs. čas; (b) creepová rychlost vs. čas; (c) creepová rychlost vs. deformace



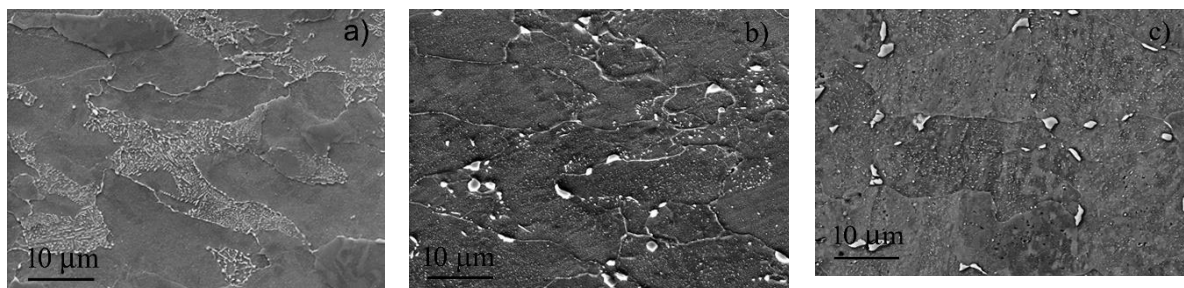
Obr. 2: Creepové charakteristiky DS stavu materiálu 15128 při napětí 200 MPa a teplotě 528 °C: (a) creepová deformace vs. čas; (b) creepová rychlost vs. čas; (c) creepová rychlost vs. deformace

Pro porovnání je do grafů (obr. 1(a)-(c)) vynesena i zkouška provedená na plochem vzorku (PV) o rozměrech 5 x 3,2 mm a délce 50 mm. Přestože hodnota minimální rychlosti creepu a lomového prodloužení je totožná s válcovým vzorkem, doba do lomu je kratší. To lze přisuzovat tvaru plochého vzorku, který je náchylnější k tvorbě povrchových trhlin a vzniku magistralní trhliny bezprostředně vedoucí k lomu.

Pro metalografickou analýzu materiálů byly na creepovaných vzorcích provedeny metalografické výbrusy v oblasti blízké lomu. Na takto připravených výbrusech byla provedena analýza mikrostruktury a hodnocení strukturálních změn způsobených vlivem creepové expozice, a především působením dlouhodobého provozního namáhání. Rozhodující vliv na dosahování vysoké meze pevnosti při tečení nízkolegovaných CrMoV ocelí má precipitační zpevnění oceli částicemi karbidu V_4C_3 vyloučenými ve formě jemného disperzního precipitátu, který účinně blokuje pohyb dislokací v průběhu creepové deformace [6].

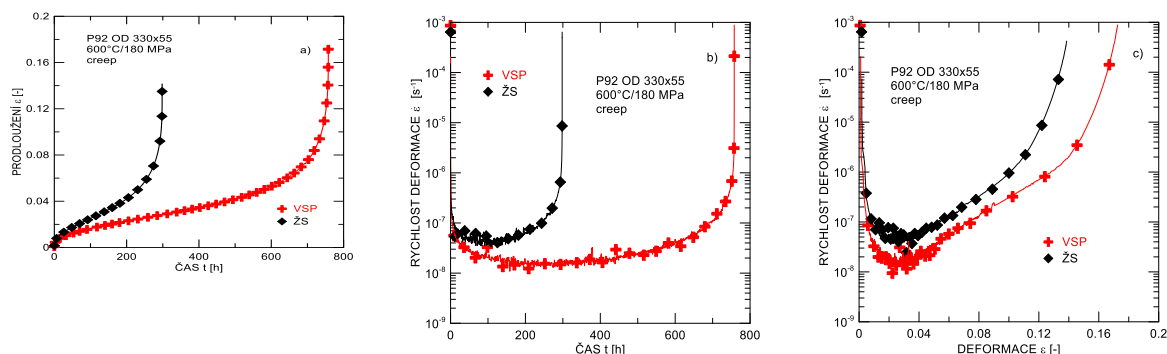
VS stav (obr. 3(a)) je tvořen feritickou strukturou s jemnými karbidy uvnitř a hrubšími karbidy na hranicích. Ve struktuře VS stavu lze pozorovat také perliticko-bainitické oblasti s částečně sferoidizovanými karbidy. V důsledku dlouhodobého provozního zatížení a teplotě se ochuzuje původně bainitické zrno o uhlík a dochází k vyloučení a růstu hrubých částic cementitu na hranicích zrn. Díky tomu tak matrice ztrácí svoji původní pevnost a eliminuje tak svůj příspěvek k precipitačnímu zpevnění (obr. 3(b),(c)). Tím lze vysvětlit výrazné snížení creepových vlastností u DS stavů. U DS stavů došlo především vlivem dlouhodobého provozu (540 °C / 240 066 h / 17,46 MPa) k rozpadu perliticko-bainitické části struktury. Obr. 3(b),(c)

ukazují, že struktura DS stavů je feritická s jemnými karbidy uvnitř zrn a s hrubými karbidy na hranicích. Avšak vlivem dlouhodobé teplotní expozice došlo k hrubnutí jak jemných karbidů uvnitř zrn, tak karbidů na hranicích ve srovnání se stavem VS (obr. 3(a)). Pokud porovnáme stavy DST a DSK (obr. 3(b),(c)), pozorujeme u DST stavu více jemných precipitátů uvnitř feritických zrn než u stavu DSK.



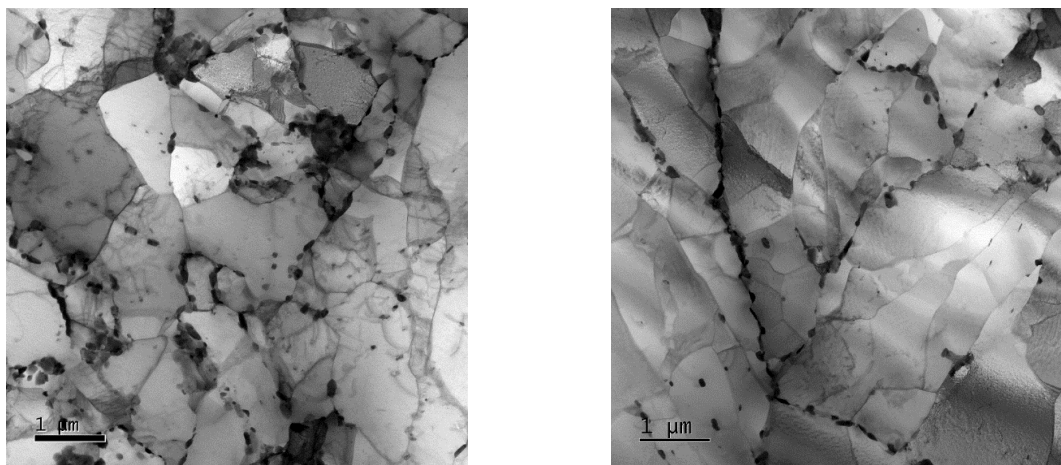
Obr. 3: Mikrostruktura stavu po creepu: a) VS stav; b) DST stav a c) DSK stav (atmosféra vzduch). Podmínky creepu: napětí 200MPa a teplota 528 °C.

Creepové chování 9% chromové oceli P92 ve výchozím (VSP) stavu a stavu po přidavném popouštění (ŽS) bylo zkoumáno v ochranné atmosféře argonu, při teplotě 600 °C a napětí 180 MPa. Jak je ukázáno na obr. 4, byly zjištěny významné rozdíly v creepovém chování oceli ve VSP stavu ve srovnání s ŽS stavem. Za prvé, ŽS stav vykazuje výrazně kratší dobu lomu (t_f) než VSP stav. Za druhé, standardní křivky prodloužení (ϵ) vs. doba do lomu (t_f) ukazují, že krátkodobé izotermické žíhání nevede ke zvýšení creepové plasticity. Je třeba poznamenat, že tvary creepových křivek pro VSP a ŽS se poněkud liší, což lépe ověříme, pokud tyto standardní křivky ϵ vs. t (obr. 4(a)) vyneseme ve formě okamžité rychlosti creepu ($\dot{\epsilon}$) proti času t (obr. 4(b)) nebo deformaci ϵ (obr. 4(c)). Přestože proces počátečního deformačního zpevnění probíhá u obou stavů téměř identicky, tj. dosažení hodnoty minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ se uskutečňuje při deformaci $\epsilon \sim 0,04$, terciární stadium probíhá rozdílně. Zatímco u ŽS stavu dochází k postupnému odpevňování až do lomu vzorku, VSP stav vykazuje v průběhu deformace $\epsilon \sim 0,08 - 0,14$ jistou fázi zpevnění. To lze přisoudit aktivní roli malých vytvrzujících částic, které významně přispívají ke zvyšování precipitačního zpevnění materiálu.



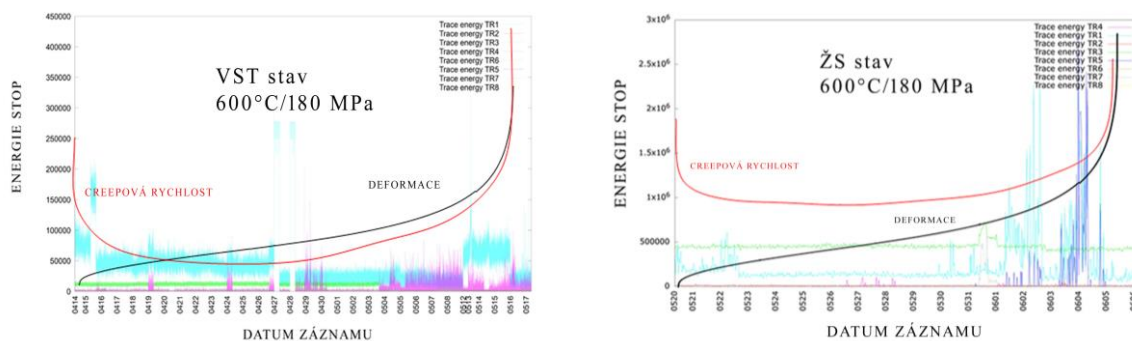
Obr. 4: Creepové charakteristiky materiálu P92 při napětí 180 MPa a teplotě 600 °C: (a) creepová deformace vs. čas; (b) creepová rychlost vs. čas; (c) creepová rychlost vs. deformace

Obrázek 5 znázorňuje TEM mikrostrukturu VSP stavu (obr. 5(a)) a ŽS stavu (obr. 5(b)). VSP stav je reprezentován hranicemi zrn dekorovanými především Cr částicemi (obr. 5(a)). Cr částice jsou také pozorovány na hranicích subzrn a uvnitř dílků zrn. Popouštěcí teplota (766 °C) vedla k mírnému poklesu v hustotě dislokací a zvýšení velikosti (sub)zrna (obr. 5(b)). Na hranicích zrn rovněž dochází k výrazné nukleaci a růstu karbidů $M_{23}C_6$ na úkor malých částic vytvářejících karbidické síťoví, což rovněž negativně ovlivňuje mez pevnosti při tečení.



Obr. 5: Mikrostruktura stavu po creepu oceli P92: a) VSP stav; b) ŽS stav. Podmínky creepu: napětí 200 MPa a teplota 600 °C

V průběhu creepových zkoušek byl zaznamenáván signál AE, a to v pravidelných intervalech třikrát denně po dobu 15 minut. Na rozdíl od klasického vyhodnocování AE, kdy se primárně vyhledává překmit signálu přes stanovenou hodnotu, zde vyhodnocení probíhalo pomocí neuronových sítí. Tyto sítě pracují na principu vytipování tvarových anomálií v signálu, které se následně systematicky vyhledávají. Z předešlých záznamů AE bylo vytipováno několik typů anomálií, které jsou označovány jako stopy (trace). Metoda DAKEL NN vyhledává v signálu tyto stopy. Do grafu se potom vykreslují počty jednotlivých stop vyhledaných v určitém časovém intervalu, jejich délky a energie. Tato grafická reprezentace dobře koreluje s grafy creepové rychlosti a creepové deformace. Podstatnou výhodou metody DAKEL NN je, že registruje nejenom stopy nad úrovní šumu, ale je schopna také vyhledat stopy, které jsou z hlediska amplitudy srovnatelné se šumem nebo dokonce i menší. Ve většině případů dochází ke změnám v množství, energii a délkách stop dříve, než na to zareagují creepová rychlost a deformace. V průběhu creepové zkoušky se záznamem AE pak můžeme sledovat a vyhodnotit množství a další parametry stop v jednotlivých stadiích creepu. Z důvodu predikce životnosti je důležité určení místa konce stacionárního a nástupu terciárního stadia creepu, což je stadium, od kterého nastává významný proces fyzikálně mikrostrukturních změn v materiálu. V případě realizovaných měření (obr. 6) byl zjištěn nárůst či změna emisní aktivity na počátku zkoušky, a především v terciárním stadiu. Dále, pro jednotlivé stavy materiálu jsou aktivní různé stopy emisních událostí. Detailnějšímu studiu těchto jevů bude věnován další výzkum. Lze tedy konstatovat, že snímáním AE ve vybraných typech provozu lze s dostatečným předstihem lokalizovat nežádoucí změny v materiálu, které vedou k destrukci celého zařízení a velkým ekonomickým ztrátám.



Obr. 6: Záznam AE creepové zkoušky (600 °C / 200 MPa): a) VSP stav; b) ŽS stav

Závěr

Provedené creepové testy ukázaly, že ocel 15 128 po dlouhodobém provozu vykazuje výrazně nižší creepovou odolnost v porovnání s výchozím stavem. Rovněž u oceli P92 došlo po dodatečném tepelném zpracování k poklesu creepové odolnosti. Důvodem je především hrubnutí karbidických částí a jejich segregace na hranicích zrn. Bylo ukázáno, že pomocí metody AE je možné u těchto dvou parovodních ocelí s předstihem diagnostikovat degradační pochody provozních materiálů.

Poděkování

Výzkumný program byl realizován za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci projektu č. TK03020089 – THĚTA a projektu č. TN1000015 NCK Strojírenství.

Literatura

- [1] Janovec, J., Poláchová, D., Junek, M. (2012): *Lifetime Assessment of a Steam Pipeline*. Acta Polytechnica, Vol. 52, pp. 74-79. ISSN 1805-2363 (online)
- [2] Mayer, H., Masuyama, F. (2008): *The development of creep-resistant steels*. Creep-resistant Steels, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (UK), pp. 15-77. ISBN 978-1-84569-178-3
- [3] Vodárek, V. (2003): *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)%Cr ocelí*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, str. 1-163. ISBN 80-248-0329-1
- [4] Koula, V. et al (2018): *Analyzátor kontinuální akustické emise pro diagnostiku erozně korozního a creepového poškození potrubních systémů*. Roční zpráva o řešení projektu, rok 2018, program TRIO MPO FV 10645, DAKEL, Praha.
- [5] Dvořák, J., Sklenička, V., Král, P., Kvapilová, M., Svobodová, M., Šifner, J., Koula, V. (2019): Detekce poruch pomocí akustické emise (AE) v podmínkách vysokoteplotního creepu. *14. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 75-80. ISBN 978-80-261-0885-6
- [6] Foldyna, V., Purmanský, J. (1989): *Role of dispersed phase in creep of ferritic steel*. Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 39, pp. 1133-1137. ISSN 0011-4626

DETEKCE CREEPOVÉHO POŠKOZENÍ SVAROVÉHO SPOJE ULTRAZVUKEM

DETECTION OF CREEP DAMAGE OF WELDED JOINT USING ULTRASONICS

Jana Veselá, Pavel Mareš a Zbyněk Špirit

Centrum výzkumu Řež s.r.o

Abstrakt

U rozvoje creepu jako časově podmíněného děje hraje hlavní roli citlivost materiálu k poškození vlivem teploty a namáhání. Svarové spoje i materiál potrubí parovodů, v České republice se jedná nejčastěji o ocel 15 128, jsou za provozu vystaveny creepovému poškození. Snahou provozovatelů elektráren je včas rozvoj creepového poškození odhalit, a to dříve, než dojde k porušení materiálu.

Pro detekci creepu je z oblasti nedestruktivního zkoušení vhodná technika Phased Array ultrazvukového zkoušení. Cílem je odlišit výrobní vady svarových spojů od indikací creepového poškození vzniklého za provozu zařízení. Pro detekci creepu jsou využívány vzorky odebrané přímo z provozu a v neposlední řadě také bohaté znalosti EPRI v této oblasti.

Abstract

In the development of creep as a time-dependent process, the sensitivity of the material to damage due to temperature and stress plays a major role. Welded joints and the material of steam pipelines, in the Czech Republic it is most often steel 15 128, are exposed to creep damage during operation. The effort of power plant operators is to detect the development of creep in time before the material damage occurs.

The Phased Array ultrasonic testing technique from the field of non-destructive testing is suitable for the detection of creep. The aim is to distinguish production defects of welded joints from indications of creep damage caused during operation of the facility. Samples taken directly from the plant and, finally, EPRI's rich knowledge in this area are used to detect creep.

Úvod

Pokračující výzkum EPRI v oblasti ultrazvukového zkoušení technikou Phased Array (PAUT) zaměřený na detekci raného creepového poškození ocelí P91 a P92, přináší významné informace o nastavení parametrů zkoušení UT, ale také o chování a citlivosti vybraných ocelí na podmínky simulujících creep. Paralelně se studiem nejnovějších poznatků EPRI jsou vyhodnocována naměřená data na vzorcích s označením PK15 a X6 z oceli 15 128.

Znalosti EPRI

V oblasti nedestruktivního zkoušení (NDT), jmenovitě využití PAUT k detekování creepového poškození bylo v posledních dvou letech zpracováno několik zpráv. Výsledky výzkumu a plánovaný vývoj dalšího poznávání jsou zpracovány ve zprávě [1].

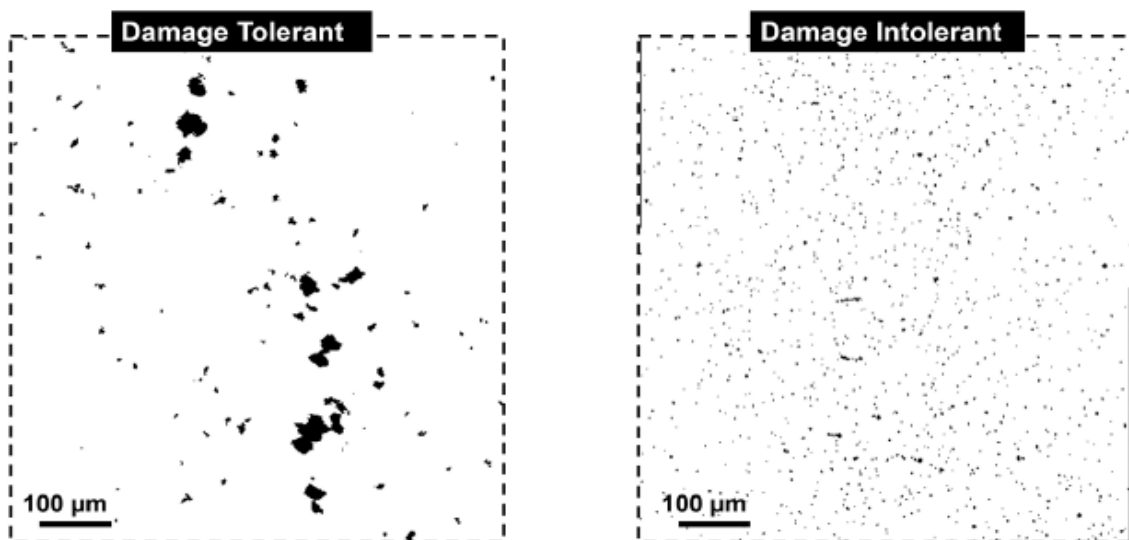
Měření tvrdosti a metalografické rozborů mikrostruktury ocelí vystavených v provozu podmínkám vedoucím k poškození potrubí creepem hledají odpovědi na rozdílné chování materiálů s ohledem na tavbu, tepelné zpracování a provozní stavy, jímž byly vystaveny.

V oblasti NDT je pozornost zaměřena na pokročilé techniky ultrazvukového zkoušení, nebo post-processing výsledků měření. Patří sem techniky Phased Array (PA), Full Matrix Capture (FMC) nebo Total Focusing Method (TFM).

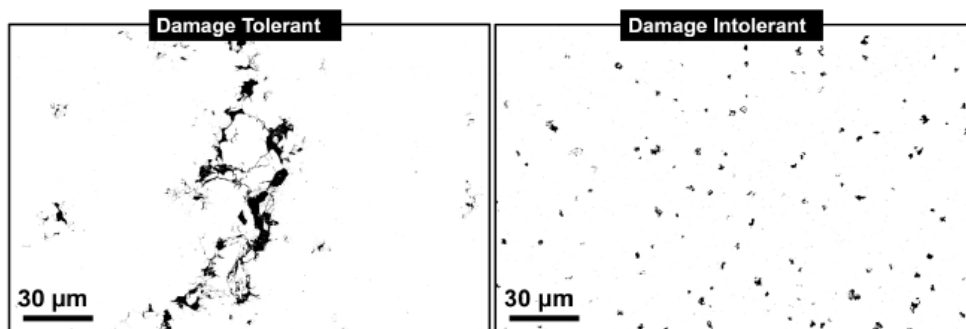
Zatím poslední zpráva EPRI z roku 2020 nejvýznamněji přispěla k rozšíření znalostí z oblasti simulace creepového poškození, výsledků detekce creepu ultrazvukem technikou PA

(PAUT) v jednotlivých etapách rozvoje creepu společně s metalografickým hodnocením mikrostruktury. Zpráva popisuje vlastní výzkum zaměřený na poznání creepového poškození v HAZ u oceli P91. Byly využity dvě odlišné tavby oceli a byl posuzován metalurgický vliv na creepové chování, vznik poškození, které by bylo možné detekovat PA ultrazvukovými technikami. Svary, které byly výzkumu podrobeny, mají typickou geometrii a byly vyrobeny obloukovým svařováním a podrobeny běžnému sub-kritickému tepelnému zpracování po svařování. Vyvinutá metodika zkoušení upravená pro tento výzkum zahrnuje zkušební vzorky s plným provařením tloušťky /profilu a jejich vystavení creepovému namáhání, s periodickým přerušováním v průběhu zátěže. Při každém takovém přerušování byly vzorky vyjmuty ze zatěžovacího stroje a bylo provedeno měření PAUT. U vzorků blízcích se konci životnosti, nebo po uplynutí zvolené doby byly ze vzorků odebrány výřezy, vyleštěny standardní metalografickou technikou a provedena mikrostrukturní analýza. Nálezy metalografického rozboru byly srovnávány s výsledky / nálezy PAUT. Zpráva detailně popisuje volbu materiálu, výrobu vzorků, vývoj zkušební metody a studii experimentální části zahrnující creep, mikrostrukturu a PAUT výsledky. Výzkum je určený k lepšímu pochopení možností techniky PAUT k detekci raného stádia creepového poškození. Z projektu také vyplynul další výsledek ve formě tvorby metodologie pro standardní vzorky určené k UT zkoušení.

Porovnání chování obou typů materiálu P91 (odolného creepu vs citlivého ke creepovému poškození) při vyčerpání 80% životnosti z pohledu creepového poškození je ve velikosti dutin, četnosti jejich výskytu a jejich růstu, obr. 1 a obr. 2.



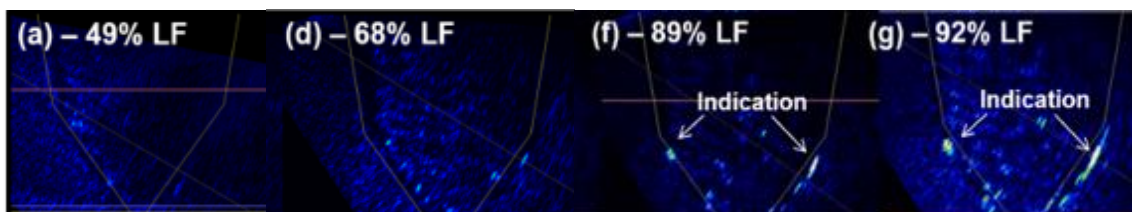
Obr. 1: Metalografické hodnocení (laserový konfokální mikroskop) obou typů oceli P91 (odhadovaná životnost 80 %) – zdroj EPRI



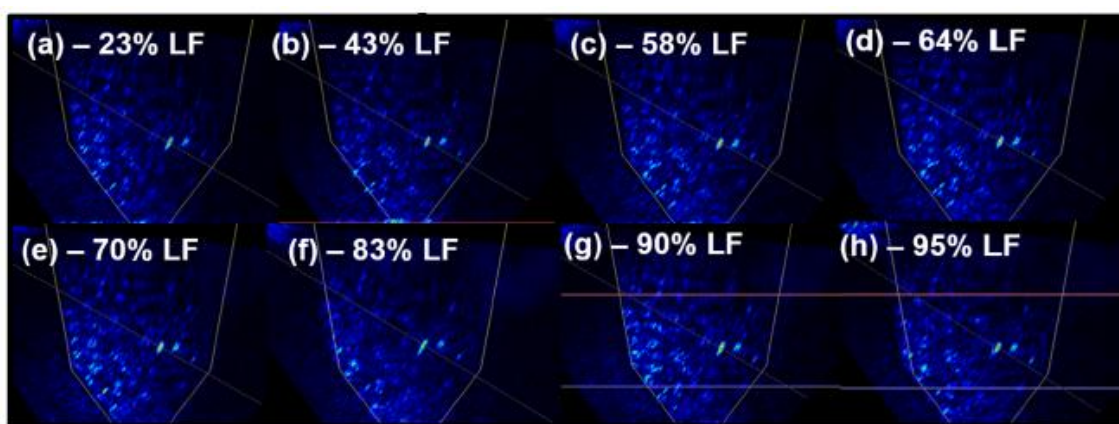
Obr. 2: Metalografické hodnocení (skenovací elektronový mikroskop) obou typů oceli P91 (odhadovaná životnost vzorků 95 %) – zdroj EPRI

Srovnání výsledků PAUT na obou typech vzorků oceli P91, vzorky se liší tavnou, přineslo zjištění, že u odolné oceli lze detekovat creepové poškození typu makrotrhlin při 89-92 % vyčerpání životnosti, obr. 3.

U oceli citlivé k creepovému poškození nejsou indikace detekovány v rozsahu 23-95 %, přestože jsou již metalograficky zjištělné, obr. 4.



Obr. 3: Ocel P91, tavnba odolná creepovému poškození – výsledky PAUT – zdroj EPRI

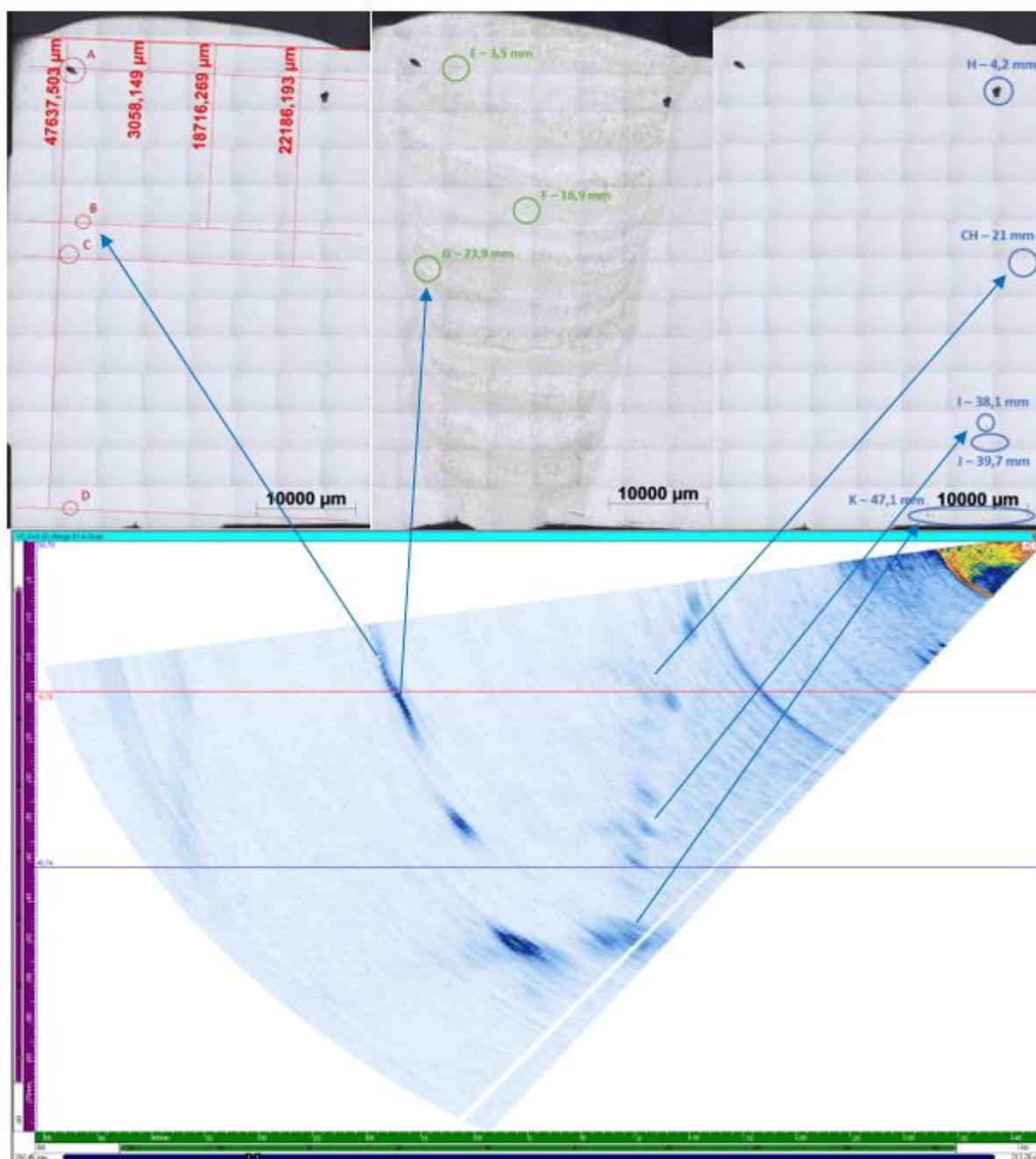


Obr. 4: Ocel P91, tavnba citlivá k creepovému poškození – výsledky PAUT – zdroj EPRI

Vzorek PK15

Vzorek parovodu PK15 z oceli 15128.9 byl podroben PAUT pro detekci možného creepového poškození svarového spoje přístrojem Dynaray 128/128 PR a PA sondou AM-10MHz s předsádkou AM-55SW, s využitím enkodéru Olympus. Vyhodnocení bylo provedeno v softwaru Ultravision 3.8R30. Popis vzorku a výsledky prvotní analýzy NDT a metalografie jsou uvedeny ve [2] a [3].

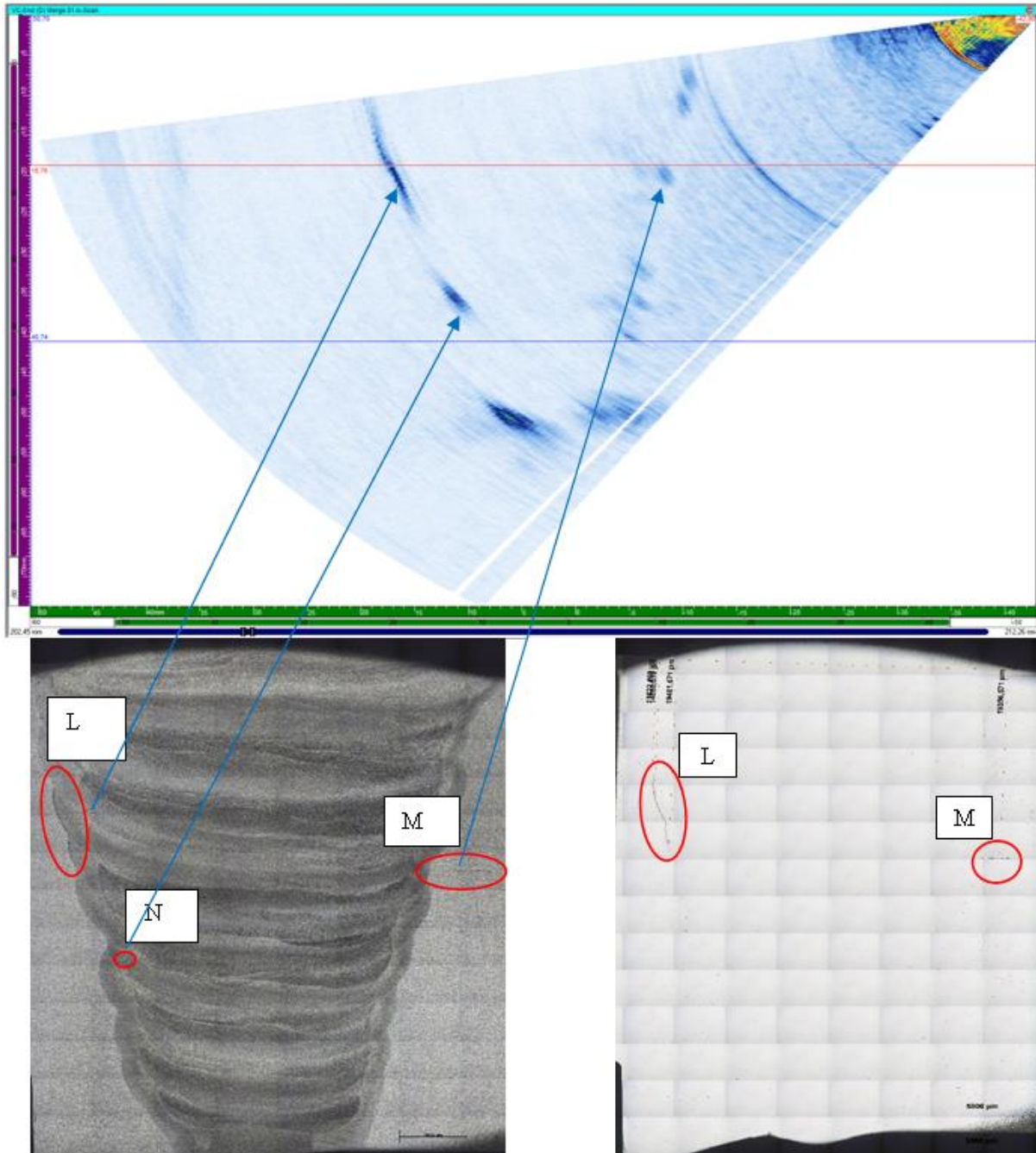
Pro srovnání výsledků UT a metalografie byl použit D-sken, zobrazení v rozsahu délky svaru 202–212 mm. Obecně lze konstatovat, že rozdíl v hloubkách indikací mezi výsledky metalografie a PAUT se pohybuje od desetin milimetru do maximálně 5 milimetrů. Příčinou rozdílu je rozdílnost odměřování technikou PAUT a mikroskopickým odměřováním od roviny teoreticky určené při metalografii. Na řezu v pozici 209 mm bylo provedeno metalografické vyhodnocení a detekovány různé typy vad, v obr. 5 označeny písmeny B, G, CH, I, J a K.



Obr. 5: Srovnání výsledků metalografického řezu v pozici 209 mm s výsledky PAUT

Vada B metalograficky vyhodnocená jako creepové kavity v hloubce 18,7 mm byla PAUT detekována v hloubce 17,4 mm. Vada G metalograficky hodnocena jako mikrostrukturní heterogenita svaru v hloubce 23,9 mm byla PAUT zachycena v hloubce 20,5 mm. Vadě CH metalograficky vyhodnocené jako creepové kavity v hloubce 21 mm, s téměř rovnoběžnou orientací vůči vnějšímu povrchu by odpovídala indikace vyznačená v hloubce 19,3 mm. Vzhledem k orientaci vady a šířce zkoumané oblasti jsou tyto typy vad téměř nedetekovatelné. Vada I byla metalograficky hodnocena jako nečistota v hloubce 38,14 mm a PAUT byla zachycena v hloubce 37 mm. Vady J a K byly metalograficky hodnoceny jako creepové kavity tvořící trhliny v hloubce 39,7 a 47,1 mm, u nichž PAUT detekoval indikace v hloubkách 39,7 a 48,1 mm. Již při předchozích analýzách bylo zjištěno, že jsou vady orientované rovnoběžně s povrchem obtížně detekovatelné. V těchto případech zřejmě došlo k částečnému odrazu ultrazvukového svazku od vhodně orientovaných částí trhlín rozvíjejících se z creepových kavit, což umožnilo jejich detekci.

Rozbor řezu v pozici 205 mm, oblast konce magistralní trhliny v místě ztavení, potvrdil výskyt vad označených písmeny L, M, N. Trhlina označená písmenem L byla rovněž detekována PAUT, obr. 6. Vada M metalograficky vyhodnocená jako creepové kavity v hloubce 19,7 mm byla detekována PAUT v hloubce 17,4 mm. Vada N metalograficky hodnocena jako mikrostrukturní heterogenita svaru v hloubce 29,4 mm byla během PAUT zachycena v hloubce 34,5 mm. Tento rozdíl může být dán změnou úhlu ultrazvukového svazku při průchodu svarovým spojem. Vzdálenost této vady od konce magistralní trhliny je stejná pro výsledky metalografie i výsledky PAUT.



Obr. 6: Srovnání výsledků metalografického řezu v pozici 205 mm s výsledky PAUT

Podařilo se detekovat vady creepového charakteru označené B, CH, J a K, kde největší délka rozvoje creepových kavit dosáhla délky trhliny cca 3 mm v poloze K.

Závěr

Pro rozlišení výrobních a provozních vad je nezbytné využívat echodynamiku a uvažovat polohu indikací ve svarovém spoji a tepelně ovlivněné oblasti jako jedny ze základních charakteristik pro určení typu vady.

Vysoká vyhledávací citlivost ultrazvukového zkoušení technikou Phased Array byla metalograficky potvrzena, stejně jako schopnost PAUT detekovat creepové poškození svarového spoje. Přesnost polohy vady je ovlivněna průchodem i deformací ultrazvukového svazku v oblasti svarového spoje s ohledem na jeho mikrostrukturu. Je doporučeno provádět měření v několika vzdálenostech od osy svaru, aby bylo zajištěno pokrytí celého objemu svarového spoje.

S ohledem na požadavky vysoké citlivosti techniky zkoušení pro detekci rané fáze degradace materiálu creepem bude technika PAUT zaměřena na aplikaci Depth Dynamic Focus (DDF) a využití nové techniky Total Focusing Method (TFM).

Poděkování

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

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

Literatura

- [1] Veselá, J. (2021): *Ultrazvukové zkoušení creepového poškození svarů*. Odborná zpráva, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.
- [2] Veselá, J., Mareš, P., Špirit, Z. (2020): Prvotní výsledky diagnostiky creepového poškození svarového spoje ultrazvukem. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, online, str. 131-136. ISBN 978-80-261-0959-4
- [3] Mareš, P., Veselá, J., Špirit, Z. (2020): *Srovnání výsledků PAUT a metalografie na vzorku PK15 ED*. Odborná zpráva, Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň.

APLIKACE EMPIRICKÝCH VZTAHŮ PRO PREDIKCI CREEPOVÉHO CHOVÁNÍ A ŽIVOTNOSTI VYSOKOTEPLŮTNÍCH MATERIÁLŮ

APPLICABILITY OF EMPIRICAL FORMULAS FOR PREDICTION OF CREEP BEHAVIOUR AND LIFETIME OF HIGH-TEMPERATURE MATERIALS

Václav Sklenička ^{a)}, Marie Kvapilová ^{a)}, Marie Svobodová ^{b)}, Jiří Dvořák ^{a)}, Petr Král ^{a)}, Květa Kuchařová ^{a)} a Josef Čmakal ^{b)}

^{a)} Ústav fyziky materiálů AV ČR, Žitkova 22, 616 62 Brno

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

Abstrakt

Predikce creepové životnosti žárovečných materiálů při vysokoteplotním namáhání, založené na znalosti jejich creepového chování, vycházejí z výsledků creepových zkoušek. Tyto zkoušky jsou však časově i finančně značně náročné. Proto byla navržena řada metodických přístupů na základě fyzikálně podložených empirických vztahů, vedoucích k jejich zkrácení a hlubší interpretaci. V příspěvku je věnována především pozornost vztahům, týkajícím se creepové plasticity a napětíové citlivosti rychlosti creepové deformace. Demonstrace jejich použití je provedena na provozně exploatované nízkolegované oceli ČSN 15128.5.

Abstract

Creep lifetime predictions of high temperature structural materials loading at high temperatures, based on the knowledge of their creep behaviour, coming out of the results of creep testing. However, creep testing is very time consuming and expensive. That is why those various methodological procedures based on physically verified empirical relationships have been proposed to shorten creep testing and deeper understanding of the results. The present study is especially focused on an experimental correlation between creep plasticity and creep rate sensitivity to stress. The application of such approach is demonstrated on service exposed low alloy steel ČSN 15128.5.

Úvod

Creep (tečení za zvýšených a vysokých teplot) lze definovat jako proces, jímž se uskutečňuje časově závislá složka plastické deformace zpravidla za konstantní teploty a konstantního působícího napětí či zatížení. Význačné a z hlediska inženýrské praxe mimořádně důležité charakteristiky creepového procesu jsou creepová pevnost, životnost a mezní creepová tažnost (plasticita). Zatímco popis creepové pevnosti a životnosti pomocí fenomenologických a empirických vztahů dospěl do značně pokročilého stadia do jisté míry respektující fyzikální podstatu zúčastněných procesů [1], relevantní popis úrovně mezní plasticity a její interpretace dosud chybí. Přitom hodnota mezní plasticity (charakterizovaná např. prodloužením 1 % [2-4] a 2 % [5] v rámci některých norem) a průběh jejího dosažení mají zásadní význam při predikci zbytkové životnosti exploatovaného materiálu.

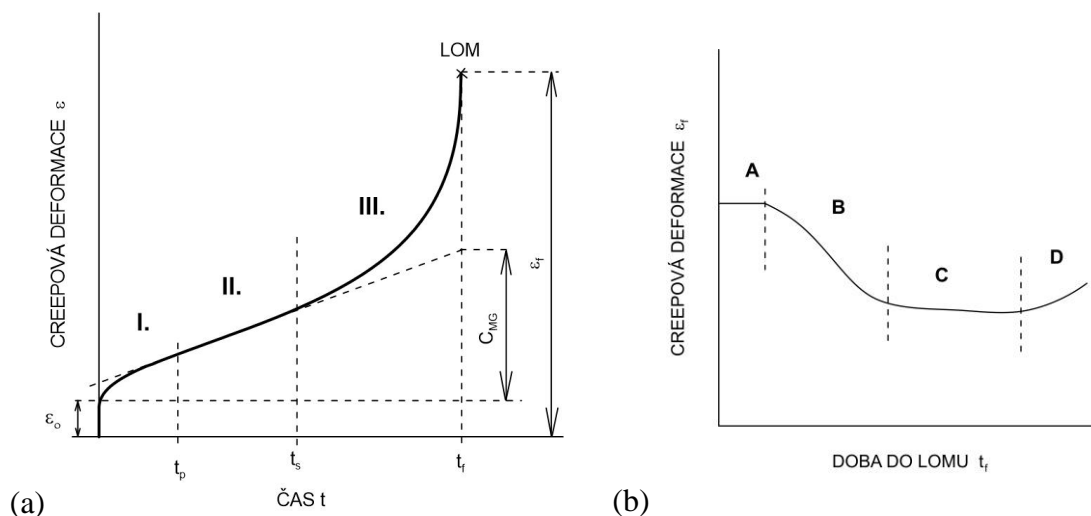
V předloženém příspěvku budou diskutovány některé empirické relace [6, 7] vztahující se k vybraným creepovým parametrům a demonstrován jejich význam na provozně exploatované nízkolegované CrMoV oceli ČSN 15 128.5.

Creepová křivka a jednotlivá stadia creepu

Ještě nedávno byla většina creepových zkoušek realizována při konstantním (počátečním) zatížení vedených do lomu (tzv. stress-rupture tests) bez průběžného měření a záznamu creepového prodloužení. Lomové prodloužení či kontrakce byly stanoveny pomocí rekonstrukce

přetrženého vzorku. V současnosti jsou respektované creepové laboratoře vybaveny zkušebními creepovými stroji, umožňujícími provedení creepových zkoušek při konstantním zatížení či napětí s plynulým záznamem nominálního poměrného creepového prodloužení v průběhu creepové expozice. Tento záznam je následně počítačově zpracován příslušným software k získání hodnot vybraných creepových parametrů.

Standardní creepová křivka na obr. 1(a) graficky znázorňuje časovou závislost creepového prodloužení. Tato křivka charakterizuje tři, případně čtyři stadia creepu zkoušky vedené do lomu vzorku. Okamžitě po zatížení vzorku dochází k deformaci ε_0 , která se skládá z elastické, anelastické a plastické složky. Zatímco u austenitických ocelí je tato deformace značná, u nízkolegovaných a středně legovaných chromových ocelí při vhodném provedení zatížení lze tuto komponentu creepové deformace zanedbat. Proto některé práce uvádějí pouze tři stadia creepu. Z technického hlediska je nejdůležitější tzv. primární (tranzitní) stadium creepu, kdy rychlost creepu klesá v důsledku probíhajícího deformačního zpevnění materiálu. Toto stadium je ukončeno dosažením minimální rychlost creepu $\dot{\varepsilon}_m$ v čase t_p a případným nástupem stacionárního creepu. V současné době je $\dot{\varepsilon}_m$ považována za kritérium skutečné (inherentní) creepové odolnosti materiálu. Ve stadiu stacionárního creepu se rychlost creepu $\dot{\varepsilon}_s$ nemění. Za určitých podmínek stadium stacionárního creepu může vymizet, takže po primárním creepu nastupuje přímo terciární creep. Obvykle se uvažuje, že minimální rychlost creepu $\dot{\varepsilon}_m$ je ekvivalentní rychlosti stacionárního creepu $\dot{\varepsilon}_s$, neboť stadium stacionárního creepu se v tomto případě redukuje pouze na inflexní bod. Konečně ve stadiu terciárního creepu jeho rychlost s časem vzrůstá. Tento vzrůst je způsobem samotným vzrůstem napětí v důsledku redukce nosného průřezu vzorku či fyzikálně metalurgickými změnami struktury a rozvojem creepového kavitačního porušení. Terciární (urychlené) stadium creepu končí lomem zkušební vzorku.



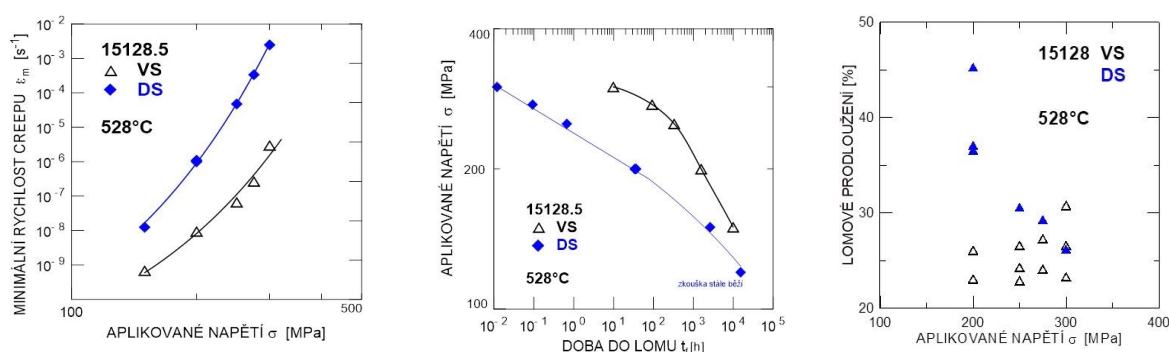
Obr. 1: Výstupy creepových zkoušek: (a) standardní creepová křivka $\varepsilon(t)$ a jednotlivá stadia creepové zkoušky, (b) závislost lomového prodloužení ε_f na době do lomu (creepové životnosti)

Obr. 1(b) ilustruje průběh hodnot creepového prodloužení ε_f na době trvání creepových zkoušek. V oblasti **A**, odpovídající velmi krátkodobým zkouškám, dostáváme zpravidla vysoké hodnoty ε_f , které odpovídají hodnotám tažnosti při tahových zkouškách za tepla. Creep v této oblasti (tzv. power-law breakdown) se popisuje jako exponenciální creep, kde přestávají platit mocninové zákonitosti dislokačního creepu, charakteristické pro nižší aplikovaná napětí. V důsledku ztráty plastické stability matrice je lom prakticky tvárný, transkrystalický. V oblasti **B**, odpovídající střednědobým creepovým zkouškám (řekněme do 10^4 hodin), dochází k průběžnému poklesu lomového prodloužení s délkou creepové expozice díky nestabilitě mikrostruk-

tury, nárůstu creepového porušení (kavitace, mikrotrhlíny) a zvyšujícímu se deformačnímu příspěvku hranic zrn k celkové creepové deformaci. Mechanismem creepu jsou interakce a pohyb mobilních dislokací a creepový lom je zpravidla kombinací transkrystalického a interkrystalického modu. Oblast **C** je oblastí extrémně dlouhodobých creepových zkoušek (zpravidla do 10^5 hodin), ve které dominují difúzí kontrolované deformační a degradační procesy především na hranicích. Tyto podmínky již relevantně zohledňují procesy a mechanismy creepového namáhání v provozní praxi vysokoteplotních komponent. Vedoucími laboratoři ve světovém měřítku jsou v této oblasti např. creepové laboratoře japonského NIMS v Tsukubě a amerického EPRI v Palo Alto. Málo prozkoumanou je oblast **D** (oblast mimo creepové zkoušky), kde se předpokládá, že přestárnutí mikrostruktury redukuje nukleaci a růst kavitáčního porušení, což má za následek růst creepové lomové plasticity.

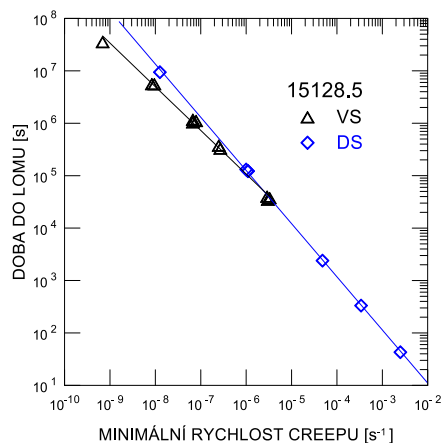
Aplikace fyzikálně metalurgického přístupu k interpretaci creepových zkoušek

Při běžné provozní kontrole VT parovodního potrubí vyrobeného z oceli 15 128.5 a o rozměrech OD 457 x 40 mm, dlouhodobě provozovaného při teplotě 528 °C, bylo zjištěno zkřehnutí materiálu. K dalšímu testování byl získán provozovaný zkřehlý segment VT parovodu (dále označen jako degradovaný stav DS) i neprovozovaný segment z rovné části parovodní trubky (dále označen jako výchozí stav VS). Řadu bližších informací lze nalézt v příspěvku Svobodová a kol. [8] ve sborníku konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení na elektrárnách v roce 2020.



Obr. 2: Napět'ové závislosti (a) minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$, (b) doby do lomu t_f , a (c) lomového prodloužení ϵ_f pro ocel 15 128.5 a zkušební teplotu 528 °C

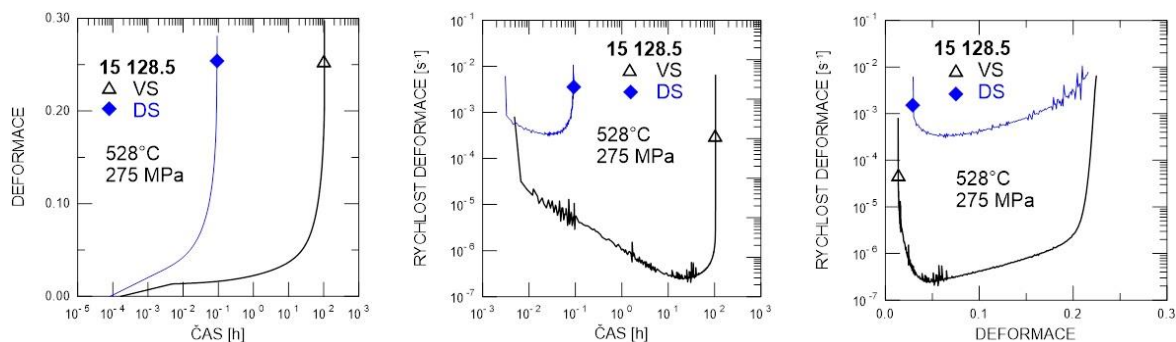
Výsledky creepových zkoušek obou stavů, provedených při zkušební teplotě 528 °C (odpovídá provozní teplotě zkřehlého segmentu) a konstantním zatížení 120 až 300 MPa v atmosféře argonu v creepových laboratořích ÚFM AV ČR, jsou souhrnně uvedeny na obr. 2 formou grafického znázornění napět'ových závislostí minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ (obr. 2(a)), doby do lomu t_f (obr. 2(b)) a lomového prodloužení ϵ_f (obr. 2(c)). Četné mechanismy creepové deformace a porušování mohou přispívat ke creepové deformaci, resp. lomu při creepu zkoušené oceli. Zúčastněné mechanismy se zpravidla vyznačují různými závislostmi na napětí σ , teplotě T a některých parametrech struktury. Při konstantní teplotě je minimální rychlost creepu $\dot{\epsilon}_m \sim (\sigma)^n$ a doba do lomu $t_f \sim (\sigma)^{-m}$. Jestliže se creepová deformace či porušování např. realizuje prostřednictvím dvou tepelně aktivovaných procesů, z nichž každý přispívá nezávisle k makroskopické deformaci, řídícím je rychlejší proces. Jsou-li působící procesy charakterizovány rozdílnými napět'ovými exponenty $n = (\partial \ln \dot{\epsilon}_m / \partial \ln \sigma)_T$ a $m = (\partial \ln t_f / \partial \ln \sigma)_T$, pozorujeme na bilogarithmických znázornění $\dot{\epsilon}_m(\sigma)$ a $t_f(\sigma)$ odchylování od lineárního průběhu (obr. 2(a),(b)) či v jiných případech existenci zlomů. Skutečně, v našem případě oba napět'ové exponenty n a m nejsou konstantní a ve sledovaném intervalu napětí σ nabývají hodnot v rozsahu od ~ 7 do ~ 27 pro oba stavy. Blízkost hodnot obou exponentů naznačuje úzký vztah mezi creepovými deformačními a lomovými procesy.



Obr. 3: Monkmanův-Grantův empirický vztah pro creepové zkoušky oceli 15 128.5

K indikaci změny působícího řídicího mechanismu a pro informativní predikci životnosti lze použít empirického Monkmanova-Grantova vztahu [9, 10], ve kterém je minimální rychlost creepu $\dot{\epsilon}_m$ spojena s dobou do lomu t_f vztahem $(\dot{\epsilon}_m)^\alpha \cdot t_f = C_{MG}$, jak je uvedeno na obr. 3. Z obr. 3 je patrné, že oba strukturální stavy se podřizují M-G relaci, stanovené hodnoty exponentů α se však liší: $\alpha = 0,86$ pro VS a $\alpha = 1,01$ pro DS. Hodnota C_{MG} představuje inherentní creepovou plasticitu (obr. 1(a)).

Pro spolehlivou predikci doby do lomu a pro stanovení maximálně přípustného extrapoláčného poměru při použití parametrických přístupů je tedy zřejmé, že úspěšná extrapolace creepových dat (rychlosti creepu, doby do lomu) je možná pouze v oblasti dominantního působení jednoho z mechanismů creepu nebo lomu při creepu (tzn. v oblasti platnosti jedné parametrické rovnice). Po dosažení hranice oblasti dominantního působení jednoho mechanismu creepové deformaci či porušování je maximálně přípustný extrapoláčný poměr 1, a to při použití libovolné parametrické rovnice. Hodnoty meze pevnosti při tečení za $2 \cdot 10^5$ hodin uváděné v našich i zahraničních normách byly většinou stanoveny extrapolací pomocí různých parametrických rovnic na základě relativně dlouhodobých zkoušek tečení (creepu) do lomu, probíhajících ale převážně v podmínkách dislokačních mechanismů creepu, charakterizovaných vysokou závislostí rychlosti creepu a doby do lomu na napětí. Je zřejmé, že uvedeným způsobem provedené odhady doby do lomu (až do $2 \cdot 10^5$ hodin) mohou být věrohodné pouze za předpokladu, že nedojde ke změně dislokačních mechanismů creepu a lomu při creepu a nepřevládne některý z mechanismů difúzního creepu [6, 7].



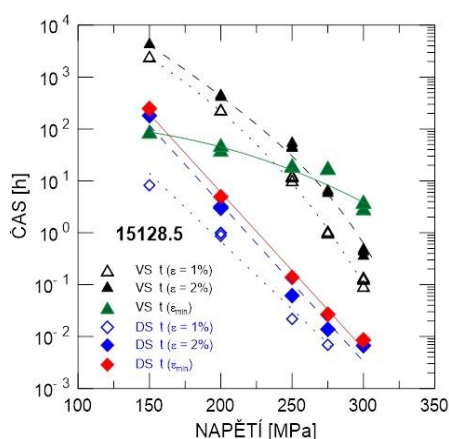
Obr. 4: Dosažení minimální rychlosti při 275 MPa pro VS a DS stavy: (a) standardní creepové křivky, (b) časové a (c) deformační závislosti

Vraťme se k otázce maximální dovolené creepové deformace zmíněné v úvodu příspěvku.

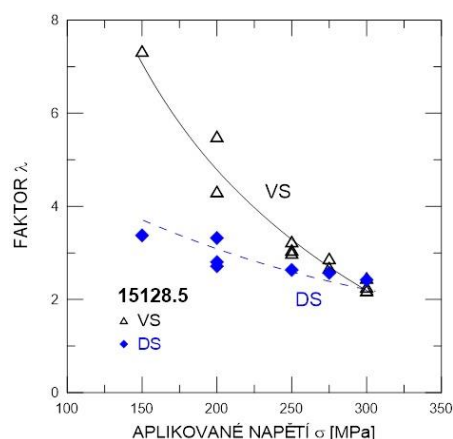
Obr. 4 poskytuje informaci, kdy a při jaké hodnotě prodloužení ε při napětí 275 MPa je dosaženo minimální rychlosti creepu $\dot{\varepsilon}_m$, kterou lze považovat za hodnotu inherentní creepové odolnosti zkoumané oceli za daných podmínek. Do jejího dosažení v průběhu primárního creepu dochází k průběžnému zpevnování materiálu v důsledku interakce dislokací. Z obr. 4 je patrné, že degradovaný stav DS vykazuje značné zkrácení doby do dosažení $\dot{\varepsilon}_m$ vzhledem k výchozímu stavu VS (obr. 4(b)). Naproti tomu, dosažení $\dot{\varepsilon}_m$ se uskutečňuje při $\varepsilon \sim 0,05$ bez ohledu na zkoumaný stav oceli (obr. 4(c)).

Obecnější závěry vyplývají z obr. 5, který přináší časovou informaci o dosažení $\dot{\varepsilon}_m$ a hodnotách prodloužení $\varepsilon = 1\%$ a 2% pro oba stavy v celém intervalu aplikovaného napětí σ . Z obr. 5 je patrné, že v důsledku provozní degradace oceli jsou všechny sledované parametry stavu DS dosaženy za podstatně kratší dobu než u stavu VS. Zatímco u degradovaného stavu DS je hodnota $\dot{\varepsilon}_m$ dosažena později než prodloužení 1% či 2% , u výchozího stavu VS jsou průběhy časových závislostí sledovaných parametrů komplikovanější. U nejvyšších napětí je $\dot{\varepsilon}_m$ dosaženo později než prodloužení 1% a 2% , avšak při napětích $\sigma \leq 250$ MPa je tomu naopak.

Pravděpodobnou příčinou rozdílného chování stavu VS je chování dislokací v oblasti nízkých a vysokých napětí. V oblasti vysokých napětí mohou dislokace překonávat částice karbidu vanadu M_4C_3 Orowanovým mechanismem [11], zatímco v oblasti nízkých napětí šplhem. Bližší analýza bude provedena po stereologickém rozboru přítomných fází a dislokační substruktury.



Obr. 5: Napěťová závislost doby do dosažení $\dot{\varepsilon}_m$, a prodloužení 1% a 2% pro oba strukturální stavy



Obr. 6: Závislost faktoru λ na napětí σ

Z oblasti mechaniky porušování pochází tzv. přípustný stupeň creepového porušení (creep damage tolerance factor) λ , který má úzkou návaznost na vztahy vycházející z Monkmanovy-Grantovy relace [10]: $\lambda = \varepsilon_f / \dot{\varepsilon}_m \cdot t_f = 1 / CMG$. Parametr λ má značný význam při odhadu citlivosti materiálu k lokalizovaným defektům v místech vysokých koncentrací napětí a může být použit jako míra creepové plasticity materiálu [10, 12, 13]. Jak vyplývá z obr. 6, s rostoucím napětím (v oblasti extrémně vysokých napětí a dislokačního creepu) hodnota faktoru λ klesá. Obecně, hodnotě $\lambda \leq 1,5$ odpovídá vysoká křehkost materiálu, způsobená např. kritickým rozvojem creepového kavitačního porušení či v důsledku difúzního creepu. Creepové zkoušky v oblasti dislokačního creepu vysokoteplotních materiálů vykazují zpravidla hodnoty $\lambda \geq 2,5 - 6,0$ [10, 12].

Závěry

Creepové zkoušky oceli 15 128.5 ve výchozím (dodaném) stavu a ve stavu po dlouhodobém provozním namáhání byly provedeny při teplotě $528\text{ }^\circ\text{C}$. Stanovené silné závislosti minimální rychlosti creepu $\dot{\varepsilon}_m$, doby do lomu t_f a lomového prodloužení ε_f na aplikovaném napětí ε obou stavů naznačují, že zkoušky byly provedeny v oblasti dislokačního creepu. Vzájemné porovnání výsledků obou stavů prokázalo značný stupeň degradace creepových vlastností provozované

trubky. Získané výsledky byly konfrontovány s možnostmi použití vybraných parametrických rovnic pro predikci creepové životnosti.

Poděkování

Finanční podporu pro řešení této studie poskytla Technologická agentura České republiky v rámci grantového projektu č. TN01000015 NCK Strojírenství.

Literatura

- [1] Sklenička, V., Kloc, L. (2011): *Creep in boiler materials: mechanisms, measurement and modelling*. J.E. Oakey (Ed.) Power plant life management and performance improvement, Woodhead Publishing Ltd., Oxford, UK, Chapter 5, pp. 180-221. ISBN 978-1-84569-726-6
- [2] OEG 13 1011 (1967): *Potrubi a armatury – Kontrola tečení parovodů a tlakových částí kotlů*. Oborová norma, Ústřední správa energetiky – Československé energetické závody, Praha.
- [3] API 579-1/ASME FFS-1 (2016): *Fitness-For-Service Assessment Standard, Third Edition*. Standard, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), American Petroleum Institute (API), USA.
- [4] ČEZ_PN_0004 (2000): *Kontrola tečení ocelí parovodů a tlakových částí kotlů*. Podniková norma, ČEZ, a. s.
- [5] ČEZ_ME_0921r00 (2012): *METODIKA. PŘS diagnostika VT a ST parovodů – měření tečení*. Podniková norma, ČEZ, a. s.
- [6] Čadek, J. (1987): *Creep in Metallic Materials*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- [7] Kassner, M. E. (2009): *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys, Second Edition*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- [8] Svobodová, M., Čmakal, J., Junek, J., Kvapilová, M. (2020): Vytipování zkřehlých částí VT odběrem strukturních replik. *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Západočeská universita v Plzni, on-line, str. 141-146. ISBN 978-80-261-0959-4
- [9] Monkman, F.C., Grant, N.J. (1956): *An empirical relationship between creep life and minimum creep rate in creep-rupture tests*. Proceedings ASTM 56, pp. 593-620.
- [10] Sklenička, V., Kuchařová, K., Král, P., Kvapilová, M., Dvořák, J. (2017): *Applicability of empirical formulas and fractography for assessment of creep life and creep fracture modes of tempered martensitic 9%Cr steel*, *Kovové materiály – Metallic Materials*, Vol. 55, pp. 69-80. ISSN 1338-4252 (online)
- [11] Foldyna, V., Sklenicka, V., Purmensky, J. (1990): Creep deformation and fracture mechanisms in low-alloy CrMoV steel. *4th International Conference Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures*, The Institute of Metals, London (UK), pp. 497-506. ISBN 0-901462-58-6
- [12] Chaudhary, B. K. (2013): *Tertiary creep behavior of 9Cr-1Mo ferritic steel*. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 585, pp. 1-9.
- [13] Leckie, F.A., Hayhurst, D.R. (1977): *Constitutive equations for creep-rupture*. *Acta Metallurgica*, Vol. 25, pp. 1059-1070.

KINETIKA RŮSTŮ KOROZNĚ-ÚNAVOVÝCH TRHLIN V OCELI COR 13/4 PRO OBĚŽNÁ KOLA VODNÍCH TURBÍN

KINETICS OF CORROSION-FATIGUE CRACKS GROWTH IN COR 13/4 STEEL FOR WATER TURBINE IMPELLERS

Josef Strejcius ^{a)}, Zdeněk Fulín ^{a)}, Michal Chocholoušek ^{a)} a Zbyněk Špirit ^{a, b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt

Příspěvek je sumarizací výsledků měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin v oceli COR 13/4 pro komponenty průtočných částí vodních turbín, provedených v letech 2019-2020 v rámci projektu NCK. Měření byla provedena ve vodě při frekvenci 30 Hz. Byly stanoveny závislosti rychlosti šíření únavových trhlin při asymetriích cyklu $R = 0,1$ a $R = 0,7$. Na základě provedených experimentů byly odhadnuty prahové hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK_{th} . Byla provedena fraktografická analýza lomových ploch.

Abstract

The paper is a summary of the results of measurements of the corrosion-fatigue crack propagation rate in COR 13/4 steel for the components of the flow sections of water turbines, carried out in 2019-2020 within the NCK project. The measurements were performed in water at the frequency of 30 Hz. The fatigue crack propagation rate dependencies at cycle asymmetries $R = 0.1$ and $R = 0.7$ were determined. On the basis of the conducted experiments the threshold values of the stress intensity factor ΔK_{th} were estimated. Fractographic analysis of fracture surfaces was performed.

Úvod

Ačkoli fenomén únavy ve vodní energetice není nový, v posledních desetiletích se mu věnuje značná pozornost. Důvodem tohoto rostoucího zájmu o aspekty únavy je zvýšená flexibilita provozu vodních elektráren. Snaha o vysokou flexibilitu je motivována různými důvody: deregulací energetických trhů, která podporuje dynamičtější provoz bloků, potřebou vyvažování sítí s rostoucí integrací intermitentních obnovitelných zdrojů a v menší, ale potenciálně rostoucí míře změnou klimatu, která zvyšuje variabilitu dostupnosti vody. Protipólem zvýšené flexibility provozu je větší zatížení součástí vodních elektráren únavou, kdy časté změny provozních podmínek a trvalý provoz v podmínkách mimo dimenzování vedou k tomu, že tyto součásti jsou vystaveny většímu počtu cyklických a dynamických zatížení. Kromě toho vysoká konkurenceschopnost mezi výrobcí turbín a generátorů často vede ke konstrukcím vysoce optimalizovaných na účinnost, což může vést ke zmenšování mechanických bezpečnostních rezerv.

Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. se v letech 2019 až 2020 podílela na vývoji metodiky pro kvalifikovaný odhad rizika únavového poškození oběžných kol z martenziticko-austenitické korozivzdorné oceli GX4CrNi13-4+QT1 (COR 13/4). V projektu podpořeného TAČR NCE/DP2S1 „Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“ byly definovány podmínky, za kterých dochází k iniciaci korozně-únavových trhlin [1] a následně byly stanoveny rychlosti jejich šíření v závislosti na působících mechanických silách. V aktuálním příspěvku je popsána metodika měření rychlosti růstu korozně-únavových trhlin ve vodě na CT vzorcích, se stanovením okamžité délky trhliny na základě kontinuálního záznamu rozdílu elektrických potenciálů nad trhlinou ve vzorku protékaném konstantním proudem. Použití metodiky je demonstrováno na příkladu stanovení

závislosti rychlosti šíření únavových trhlin v oceli COR13/4 ve vodě při asymetrii cyklu $R = 0,1$.

Experimentální materiál

Studovaný materiál je martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel na odlitky GX4CrNi13-4 (1.4317 EN, COR 13/4) v zušlechtěném stavu QT1, vyrobená technologií VOD (oxidační vakuování v uzavřeném kesonu), firmou Litostroj Engineering, a.s. Materiál byl dodán ve formě přilíhých zkušebních bloků z výroby rozváděcích lopatek. Tepelné zpracování bylo provedeno režimem kalení 1050 ± 15 °C / 15 h / vzduch // popuštění 610 ± 10 °C / 18 h / vzduch // žihání 580 ± 10 °C / pec. Bylo ověřeno chemické složení materiálu a stanoveny pevnostní charakteristiky.

Tab. 1: Výsledky chemické analýzy oceli COR 13/4

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Koncentrace (% hm.)	0,038	0,338	0,801	0,033	0,004	0,282	3,826	12,435	0,434
Směrodatná odchylka	0,0046	0,0033	0,0027	0,0005	0,0004	0,0016	0,0570	0,1600	0,0013

Tab. 2: Mechanické vlastnosti oceli COR 13/4

	m_E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{30} [%]	A_{manual} [%]	Z [%]
Průměr	297	579	841	7,10	19,2	20,9	66
Směrodatná odchylka	20	14	6	0,12	0,6	1,2	1

Materiál je izotropní, struktura je tvořena popuštěným laťkovým martenzitem s malým množstvím δ feritu. Ve struktuře jsou oxidické městky. V oceli jsou licí vady ve formě kavit. Vyhodnocením difrakčních záznamů byl z amplitudy Braggových píků pro austenit a ferit odhadnut obsah reformovaného austenitu na 19,4 % hm.

Měření rychlosti šíření únavových trhlin

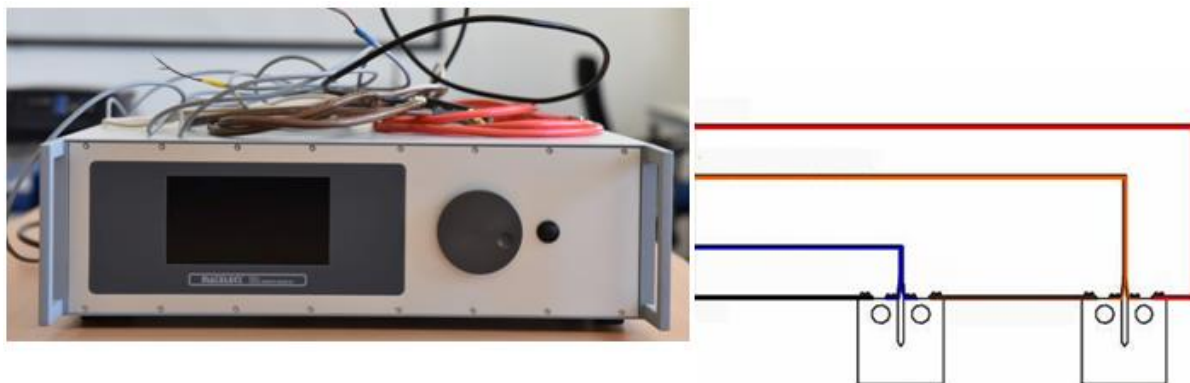
Měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin ve vodě byla provedena na CT tělesech na stroji Elektropuls 10 kN při konstantní zatěžovací frekvenci 30 Hz a dvou režimech řízení síly: pro měření rychlosti šíření trhliny byl použit postup držení konstantní hodnoty horní a dolní síly a pro stanovení prahové hodnoty ΔK_{th} postupné snižování maximální síly po krocích 5 % z výchozí hodnoty. Zatěžovací cyklus měl sinusový průběh.

Metodika stanovení okamžité délky trhliny únavové trhliny

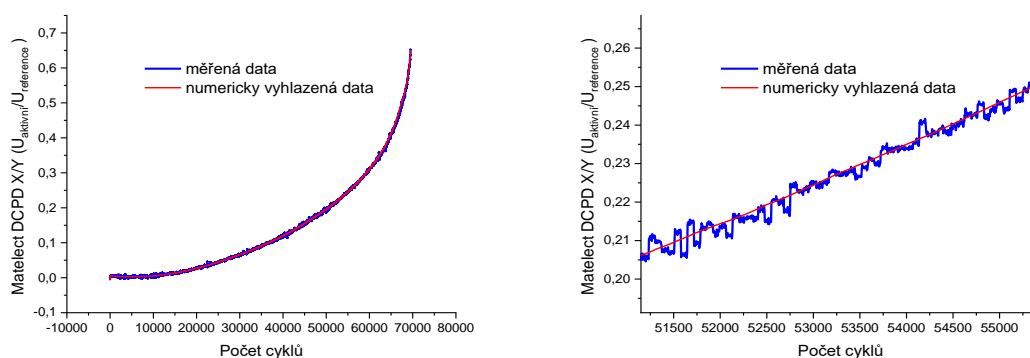
Okamžité délky únavových trhlin v CT tělesech byly měřeny na základě změny elektrického potenciálu nad trhlinou při průchodu pulzního stejnosměrného proudu technikou DCPD (Direct Current Potential Drop) s přístrojem DCM2 od firmy Matelect. Principem stejnosměrných potenciálových metod je měření napětí na povrchu vzorku protékaného elektrickým proudem a výpočet specifického odporu materiálu. Měření se nejčastěji provádí čtyřbodovou metodou, kdy dvě krajní elektrody slouží pro zavádění proudu do měřeného vzorku a prostřední slouží k měření rozdílu potenciálů na trhlině. Pro přesné stanovení délky trhliny je zapotřebí konstrukce kalibračního grafu.

V této práci byla použita modifikovaná varianta měření DCPD X/Y. V proudovém okruhu byla v sérii zapojena 2 CT tělesa, jedno aktivní mechanicky namáhané, druhé bez mechanického zatížení viz obr. 1. Tento přístup eliminuje chyby měření způsobené kombinací rozdílných materiálů vzorku a elektrických přívodů. Měření probíhalo v pulzním režimu: byl

používán proud 5 A, opakovací frekvence proudových pulzů byla cca 2 s. Pulzy nebyly synchronizovány s frekvencí zkušebního stroje.



Obr. 1: Schéma zapojení při měření délky trhliny technikou DCPD X/Y



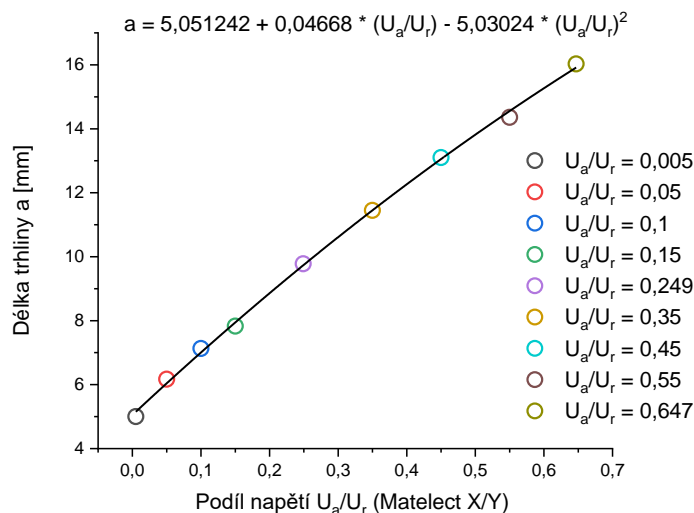
Obr. 2: Závislost poměru napětí na CT vzorcích v průběhu únavového testu

Hodnota poměru měřených napětí na CT tělesech je po zesílení a normalizaci posílána na další zpracování do elektroniky zkušebního stroje Electropuls 10000. Hodnoty jsou čteny programem WaveMetrix. Signál je mírně zašuměn, hlavní důvod je chybějící synchronizace proudových pulzů se zatěžovací frekvencí únavového stroje – napětí je stanovováno v nahodilých fázích rozevření trhliny a dále použitou frekvencí ukládání dat, která v závislost na předpokládané hodnotě rychlosti šíření trhliny a s tím spojeného množství ukládaných dat se pohybuje v intervalu 10 až 1000 cyklů. Tento šum je možné relativně dobře odstranit vhodnou numerickou filtrací dat. Příklad záznamu poměru napětí měřeného technikou DCPD X/Y během únavového testu je na obr. 2. Modrá čára odpovídá přenášeným datům z Matelectu, červená hodnotám počítaným na bázi váženého klouzavého průměru.

Pro konstrukci kalibračního grafu byly na CT tělesech nakmitány únavové trhliny různé délky pro hodnoty poměru napětí nad trhlinou aktivního a neaktivního vzorku v intervalu 0 až 0,65. Po nakmitání trhlin a po následném rozlomení vzorků byly na optickém mikroskopu určeny normované délky únavových trhlin (z podílu plochy odpovídající šíření trhliny a tloušťky zkušebního tělesa). Pro zvýraznění čel trhlin byly vzorky před rozlomením krátce temperovány na teplotě 450 °C. Hodnoty normovaných délek únavových trhlin odpovídající příslušným hodnotám poměrů potenciálů byly vyneseny do grafu a body byly proloženy polynomem 2 stupně. Na základě kalibrace byl pro výpočet okamžité délky trhliny používán vztah:

$$a = 5,051242 + 0,04668 \cdot (U_a/U_r) - 5,03024 \cdot (U_a/U_r)^2, \quad (1)$$

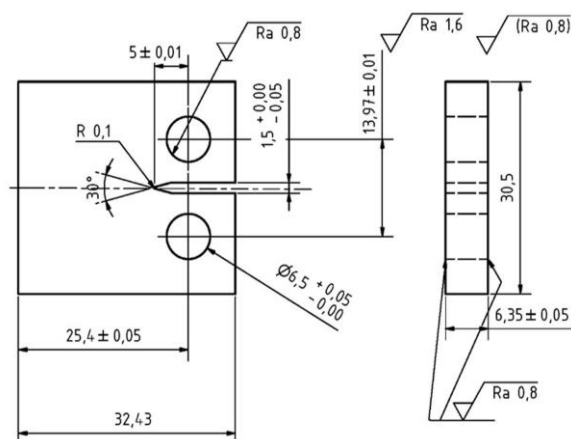
kde a je okamžitá délka trhliny včetně iniciačního vrubu měřená v mm a U_a/U_r hodnota poměru napětí nad trhlinou měřeného a srovnávacího vzorku.



Obr. 3: Kalibrační graf: závislost délky trhliny na podílu elektrického napětí na zkušebním a referenčním CT tělese

Rychlost šíření korozně-únavových trhlin při asymetrii cyklu $R = 0,1$

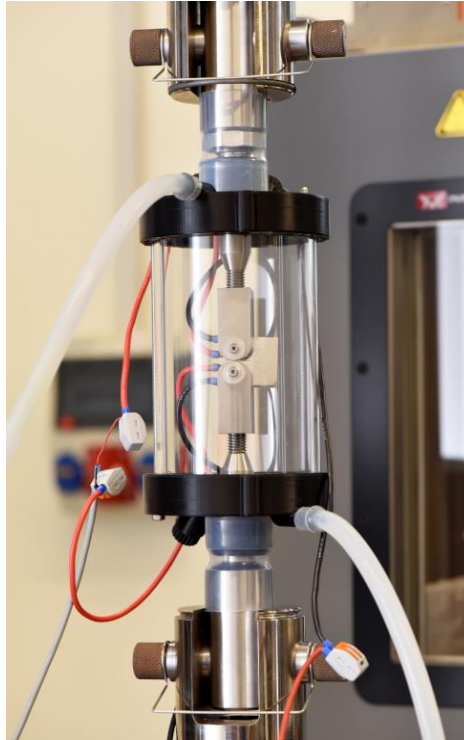
Pro stanovení rychlosti růstu korozně-únavových trhlin ve vodě a odpovídajících hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí při asymetrii cyklu $R = 0,1$ byla použita standardní $\frac{1}{2}$ " CT zkušební tělesa s redukovanou tloušťkou a iniciačním vrubem 5 mm dle výkresu na obr. 4.



Obr. 4: Zkušební tělesa pro zkoušky rychlosti šíření trhlin

Ke vzorkům byly v ploše s iniciačním vrubem přivařeny 4 elektrické přívody – Cu lanka se silikonovou izolací – dvě pro přívod elektrického proudu a dvě pro měření elektrického napětí. Upínací systém (sestava třmenů a spojovacích kolíků pro fixaci CT vzorku), který je při testu ponořen do zkušebního roztoku, byl vyroben z martenzitické nerezavějící chromové oceli T 552.

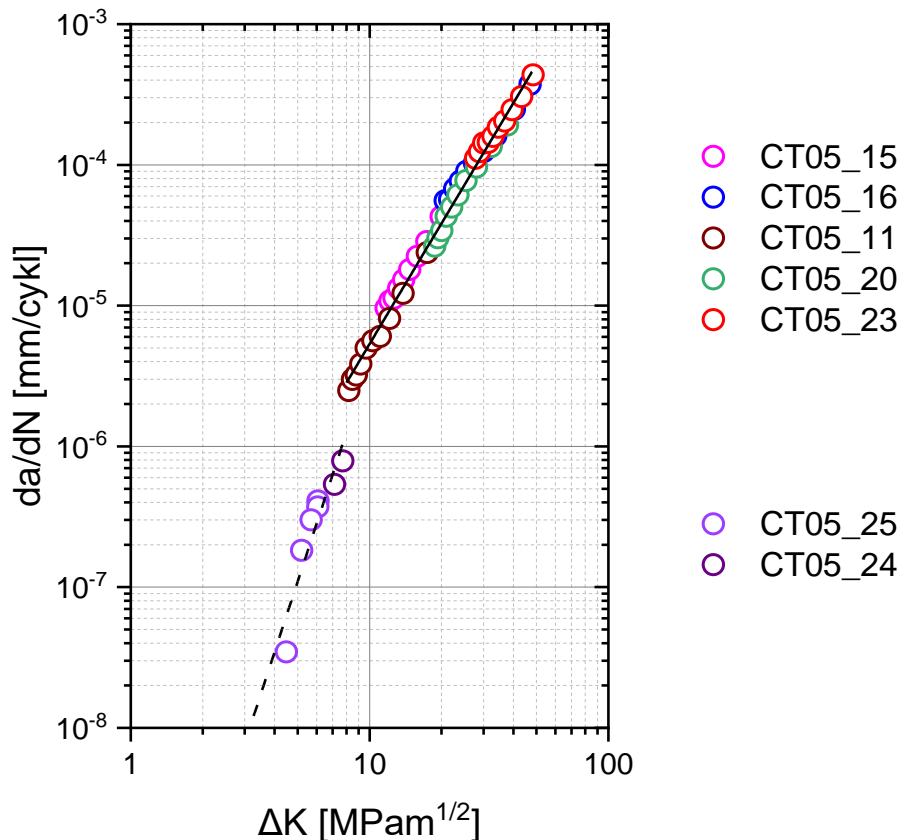
Mechanicky zatěžovaný CT vzorek při měření rychlosti šíření korozně-únavových trhlin byl umístěn v průtočné měřicí korozní cele v pracovním prostoru zkušebního únavového stroje – viz obr. 5, referenční CT vzorek byl ponořen v zásobníku zkušebního roztoku. Zkušebním roztokem byla voda s přídavkem chloridu sodného v koncentraci 500 mg/l, chlazená na teplotu 15 ± 1 °C. Cirkulace vody mezi zkušební korozní celou a chlazeným zásobníkem byla zajištěna membránovým čerpadlem s průtokem cca 2 l/min, objem vody ve smyčce byl 5 l. Celý vodní okruh byl vyroben z korozně odolných materiálů: teflon, sklo, silikon.



Obr. 5: Zkušební cela pro zkoušky rychlosti šíření trhlin

Při stanovení rychlosti šíření korozně únavových trhlin v závislosti na rozkmitu faktoru napětí ΔK a prahové hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_{th} bylo postupováno v souladu s doporučeními v normách ČSN ISO1782-1, ČSN ISO 12108 a ASTM Standard E 647. Pro měření rychlosti pro $da/dN > 10^{-6}$ mm/cykl byl použit postup s rostoucím ΔK – test s konstantní amplitudou síly, pro $da/dN < 10^{-6}$ mm pak metoda měření s klesajícím ΔK . Výsledky měření rychlosti šíření korozně únavové trhliny v závislosti na faktoru intenzity napětí při asymetrii cyklu $R = 0,1$ ve vodě jsou zpracovány v grafu na obr. 6. Závislost rychlosti šíření únavové trhliny ve vodě, při frekvenci zatěžování 30 Hz a asymetrii cyklu $R = 0,1$ lze v intervalu hodnot rozkmitu součinitel intenzity napětí od 10 do 50 MPam^{1/2} popsat vztahem: $da/dN = 7,66E-9 \cdot \Delta K^{2,84}$.

Prahová hodnota růstu únavové trhliny ΔK_{th} obecně odpovídá asymptotické hodnotě ΔK , pro kterou se odpovídající rychlost da/dN blíží k nule. Obvykle se definuje jako hodnota ΔK odpovídající rychlosti růstu trhliny, která se rovná rychlosti šíření 10^{-8} / cykl. Prahová hodnota faktoru intenzity napětí byla odhadnuta na základě proložení přímkou dolní desítkou údajů $\log da/dN$ versus $\log \Delta K$ - $\Delta K_{th} = 3,2$ MPam^{1/2}. Je nižší než ve zprávě ÚFM ČSAV [2].



Obr. 6: Závislost rychlosti šíření únavové trhliny na rozkmitu faktoru intenzity napětí v oceli COR 13/4 při frekvenci zatěžování 30 Hz ve vodě a asymetrii cyklu $R = 0,1$

Závěr

Potenciálová stejnosměrná metoda DCPD X/Y je použitelná pro stanovení délek trhlín v kovových materiálech exponovaných v roztocích elektricky vodivých elektrolytů.

Závislost rychlosti šíření únavové trhliny ve vodě, při frekvenci zatěžování 30 Hz a asymetrii cyklu $R = 0,1$ lze v intervalu hodnot rozkmitu součinitel intenzity napětí od 10 do 50 $\text{MPam}^{1/2}$ popsat vztahem: $da/dN = 7,66E-9 \cdot \Delta K^{2,84}$.

Na základě provedených experimentů byla odhadnuta prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí $\Delta K_{th} = 3,2 \text{ MPam}^{1/2}$.

Poděkování

Předložená práce vznikla díky projektu podporovaného TA ČR č. TN01000007 v rámci programu Národní centra kompetence – 1. VS.

Literatura

- [1] Strejcius, J., Špirit, Z., Fulín, Z., Chocholoušek, M. (2020): Korozně únavové vlastnosti oceli COR 13/4 pro komponenty vodních turbín. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, online, str. 119-124. ISBN 978-80-261-0959-4
- [2] Pokorný, P., Hutař, P. (2018): *Stanovení rychlosti šíření únavové trhliny v materiálu GX4CrNi13.4+QT1*. Výzkumná zpráva, Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Brno.

MOŽNOSTI DETEKCE KAVITACE POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE NA VODNÍCH STROJÍCH S DŮRAZEM NA ÚSPORU ENERGÍÍ A PROVOZNÍ UDRŽITELNOST

POSSIBILITIES OF CAVITATION DETECTION USING ACOUSTIC EMISSIONS ON WATER MACHINES WITH AN EMPHASIS ON ENERGY SAVINGS AND OPERATIONAL SUSTAINABILITY

Jan Šifner ^{a)}, Václav Koula ^{a)} a Martin Hudec ^{b)}

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

^{b)} Vysoké učení technické v Brně, Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana

Abstrakt

Pokročilé metody vyhodnocování akustické emise umožňují úspěšně eliminovat provozní šum zařízení a zaměřit vyhodnocení na určitý konkrétní problém. V tomto případě jde o vznik kavitačních bublin, které způsobují řadu problémů od abrazie materiálu až po vibrace stroje, které mohou vést až ke strukturálním poruchám. Monitorování kavitace při provozu stroje pomocí pokročilých metod akustické emise umožňuje detekovat vznikající kavitaci snáze a s mnohem větší citlivostí než při využití standardních metod detekce kavitace.

Informace získané snímáním akustické emise mohou sloužit provozovateli stroje nejen pro diagnostiku stroje a prediktivní údržbu, ale také, a to zejména pro ekonomické hodnocení dopadů kavitace v různých provozních režimech. Pokročilé systémy diagnostiky spolu s digitálním modelem tvoří základ při tvorbě „digitálního dvojčete“ zařízení.

Abstract

Advanced acoustic emission evaluation methods make it possible to successfully eliminate equipment operating noise and focus evaluation on a specific problem. In this case, it is the formation of cavitation bubbles, which cause a number of problems from abrasion of the machine material to vibrations, which can lead to structural failures. Monitoring cavitation during machine operation using advanced acoustic emission methods makes it possible to detect emerging cavitation more easily and with much greater sensitivity than when using standard cavitation detection methods.

The information obtained from the measurement of acoustic emission can be used by the machine operator not only for machine diagnostics and predictive maintenance, but also, in particular, for the economic evaluation of the effects of cavitation in various operating modes. Advanced diagnostic systems, together with the digital model, form the cornerstone of the creation of the "digital twin" device.

Úvod

Snímání akustické emise (AE) patří do skupiny nedestruktivních defektoskopických zkoušek. Metoda je založena na snímání elastického vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů objevujících se v materiálu při jeho zatěžování vnitřními nebo vnějšími silami. To umožňuje sledovat defekty s citlivostí téměř nedosažitelnou jinými metodami. AE je metoda integrální, která při vhodně rozmístěných snímačích umožňuje provádět najednou inspekci rozměrných a strukturálně komplikovaných zařízení. Donedávna limitující pro použití AE byl provozní šum monitorovaného zařízení. Klasickými metodami vyhodnocování AE bylo obtížné vyhledávat emisní události v provozním šumu. Tento nedostatek odstraňují pokročilé metody vyhodnocení AE rozpracované ve Středisku technické diagnostiky DAKEL.

Primárně se AE využívá pro detekci strukturálních defektů v pevných materiálech, ale stejně tak dobře ji lze využít pro detekci kavitace. Kavitační je vznik dutin v kapalině při dostatečně velkém poklesu tlaku. Ten může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitační), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitační). Dutina je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitační vytvořil, dochází k implozi a dutina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitační vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině.

Imploze dutin při kavitační způsobuje nejen zvukové efekty, ale také snižuje účinnost strojů a může způsobit i mechanické poškození povrchových vrstev konstrukčních materiálů. Zvukové projevy kavitační mají charakter ultrazvukového signálu a je možné je zaznamenávat a vyhodnocovat s využitím diagnostických systémů pro oblast akustické emise (AE).

Pokusy o detekci kavitační pomocí měření akustické emise v Československu sahají do 70. let minulého století. Profesor Oldřich Taraba se svým týmem na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze konstruoval mimo jiné i přístroje umožňující detekci a jednoduchou kvantifikaci kavitačních jevů.

DAKEL – středisko technické diagnostiky ZD Rpety se zabývá využitím AE v nedestruktivní diagnostice (tlakové zkoušky, namáhání strojírenských konstrukcí) více než 30 let. Současně ale také vyvíjí nová zařízení a systémy pro diagnostiku AE. Spolupracuje s vysokými školami a vědeckými institucemi. Výsledkem jsou systémy s vysoce citlivými snímači, rozlišením 18 bitů a vzorkovací frekvencí 15 MHz. Díky unikátním zesilovačům je možné dosáhnout celkové zesílení měřicího řetězce až 130 dB. A právě takový systém jsme použili ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství VUT v Brně při ověřování možnosti studia kavitačních jevů s využitím metod diagnostiky AE, protože kavitační pokládáme, zejména v oblasti čerpadel a turbín, za důležitý problém.



Obr. 1: Měření v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana (v popředí aparatura IPL3x4)

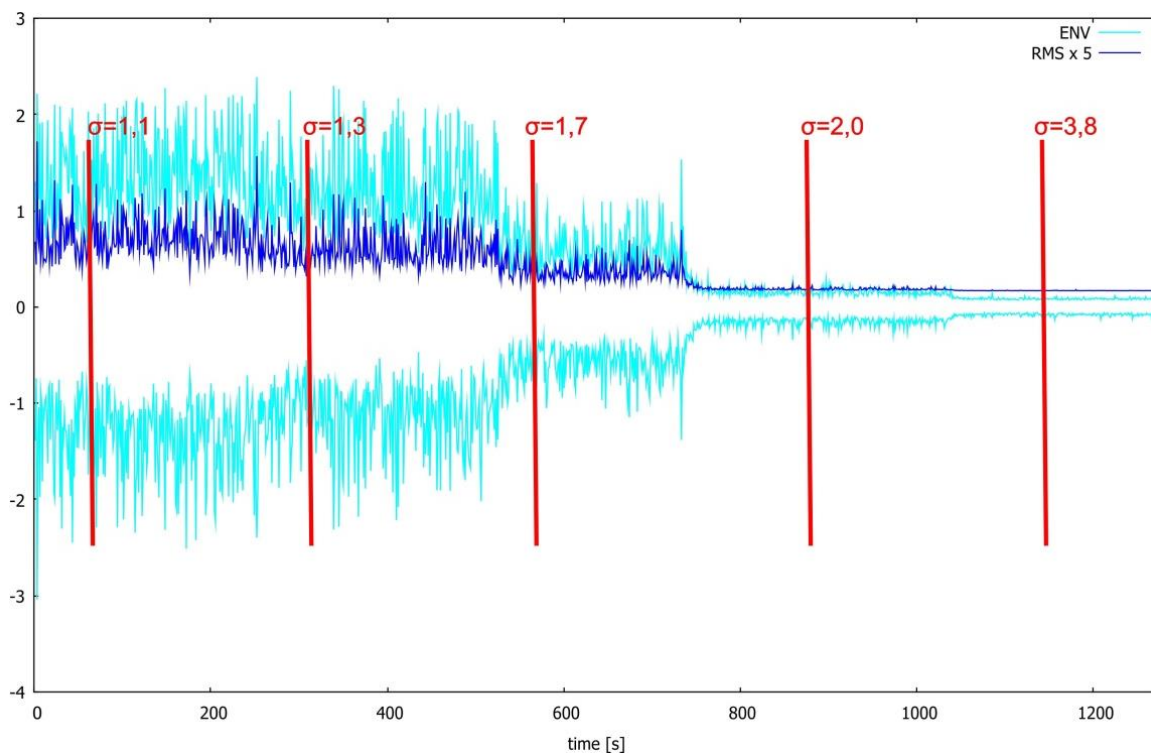
Experimentální a testovací podmínky

V laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana Energetického ústavu jsme testovali na vírové turbíně možnosti diagnostiky kavitační s využitím našich systémů pro AE.

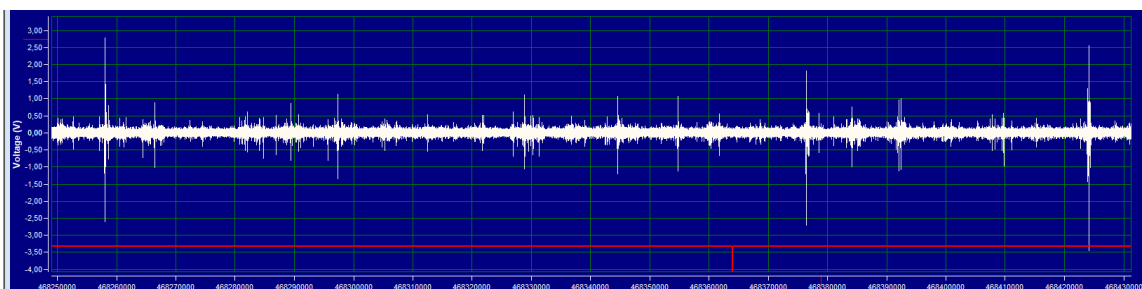
Vírová turbína byla osazena standardním systémem snímání hydraulických a mechanických veličin, s jejichž využitím byl monitorován a řízen provozní stav. Současně byly osazeny 3 snímače dynamických veličin, piezoelektrický snímač tlaku Kistler 211B6, snímač zrychlení PCB 352A60 a mikrofon G.R.A.S 40PH. Měřicí ústředna NI PXI s kartou PXIe-4492 s vzorkovací frekvencí 200 kHz.

Provozní data pro jednotlivé měřicí body a hodnoty kavitačního součinitele σ byla snímána a průběžně ukládána s frekvencí 1 kHz nebo 10 Hz.

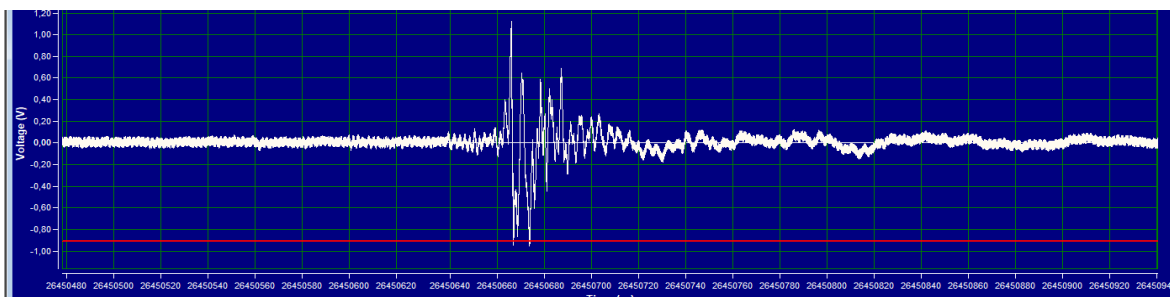
Měření AE probíhalo aparaturou IPL3x4 (4 kanály, 18 bit, 15 MHz) na daném modelu Vírové turbíny s uniformní lopatkovou mříží, 6 lopatek, nastavených na 6° , postupně byly nastavovány provozní parametry, které odpovídaly hodnotám veličiny σ od tzv. „superkavitace“ při $\sigma = 1,1$ až po stav bez kavitace při $\sigma = 3,8$. Byly použity kontaktní snímače DAKEL MDK13AS42 s vestavěným předzesilovačem 42 dB.



Obr. 1: Obálka (tyrkysová) a RMS (modrá) záznamu signálu kavitace při 102,5 ot/min zaznamenaná aparaturou IPL3x4

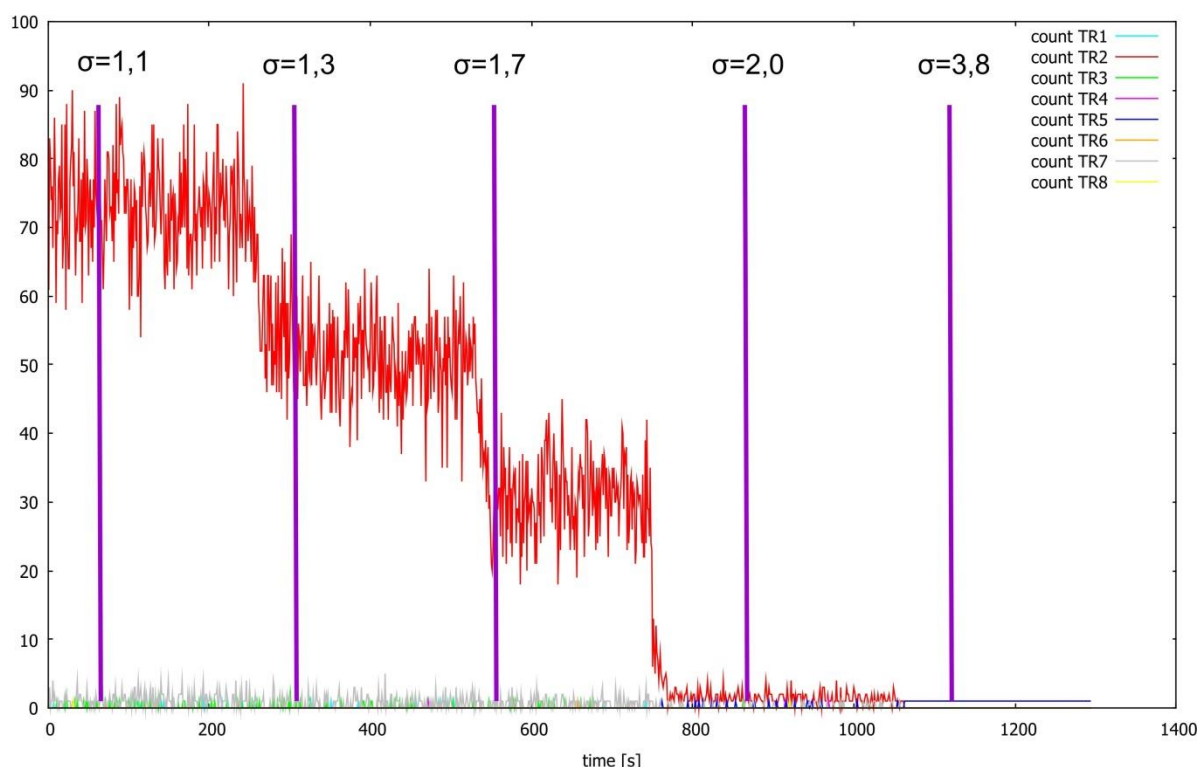


Obr. 2: Zaznamenaný signál AE kavitace – imploze kavitačních dutin při $\sigma = 1,1$



Obr. 3: Detail signálu AE – imploze kavitační dutiny při $\sigma = 1,1$

Experimenty ukázaly, že s využitím snímání je AE možné detekovat, zaznamenat a analyzovat akustické projevy kavitace. V laboratorních podmínkách je možné zaznamenat jednotlivé imploze kavitačních dutin (obr. 3 a obr. 4). Pokud jde o vyhodnocení míry kavitace, nabízí se využít standardní postupy AE, tedy záznam a vyhodnocení obálky a RMS signálu AE. Rozeznání jednotlivých fází je obtížné díky tomu, že se v signálu vyskytují vysoce energetické špičky v důsledku implozi kavitačních bublin.



Obr. 4: Vyhodnocení stop v signálu pomocí umělé inteligence (počet nalezených stop za 1 s, pravděpodobnost detekce 90 % – stopy, u kterých je nižší pravděpodobnost správného rozeznání byly potlačeny)

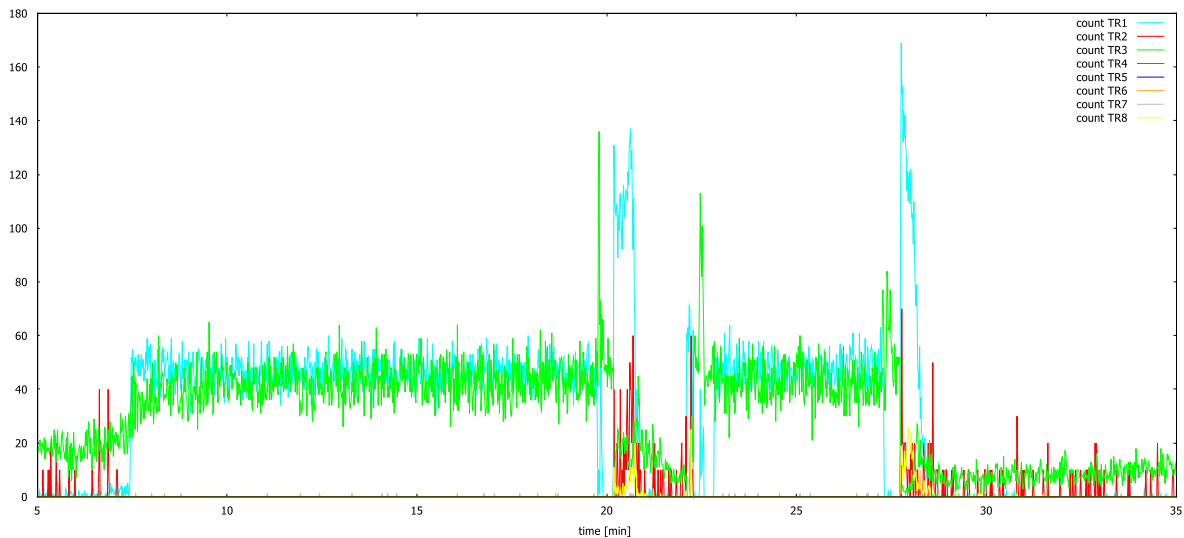
Zdaleka nejpřesnější pro detekci a určení míry kavitace je vyhodnocení signálu pomocí nástrojů umělé inteligence. Na obr. 5 je vidět, že křivka červené stopy (trace 2) přesně odpovídá změnám σ . Modrá křivka (trace 5) odpovídá přestavování spádu v modelu pomocí stlačeného vzduchu (až do $\sigma = 2$ je v systému podtlak).

Metoda vyvinutá DAKEL využívá k analýze signálu AE neuronovou síť, která v signálu vyhledává a rozlišuje typové „stopy – trace“ – předpokládané projevy monitorovaného jevu. V tomto případě byla využita síť, která byla naučena na vyhledávání 8 různých „stop“. Tato analýza signálu AE se ukázala jako použitelná i v případě, kdy je signál AE značně zarušen provozním šumem (proudění vody, činnost čerpadel modelu atd.).

Nasazení pokročilých metod v reálném provozu

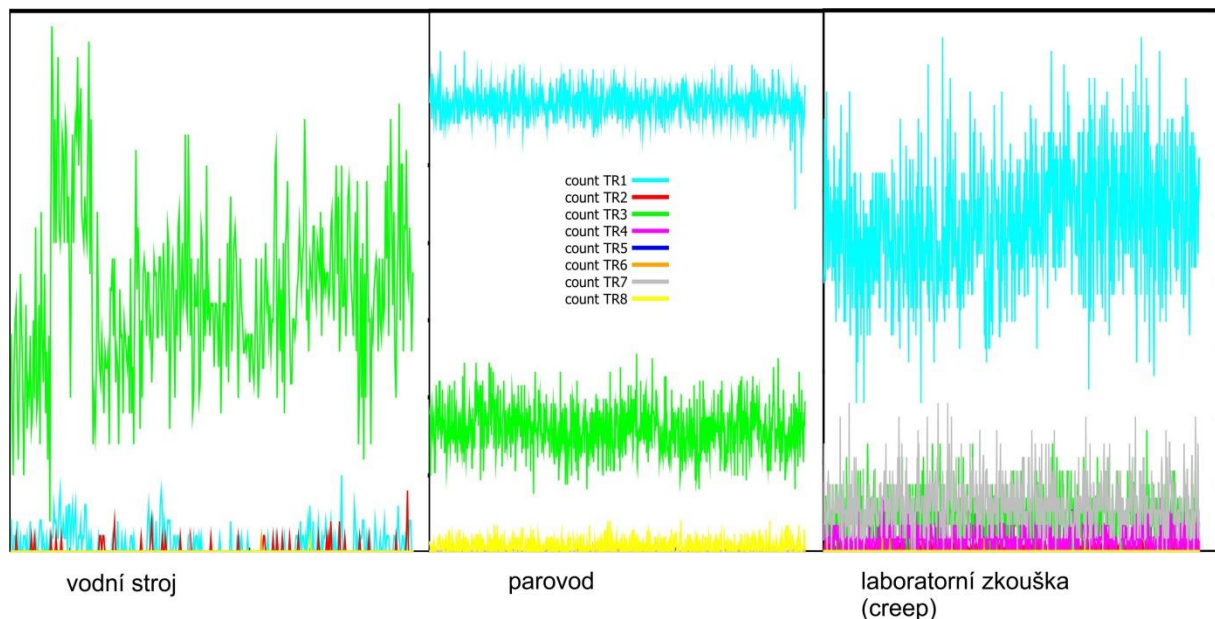
DAKEL měl k dispozici krátká kontinuální data AE z TG2 EDS (přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně). Ačkoliv tato data nebyla primárně získaná pro tento účel a byla měřena jinou aparaturou (průmyslový systém ZEDO), podrobili jsme je stejné analýze jako data z laboratoře.

Snímače byly umístěny na lopatkách rozváděcího kola a účelem měření bylo monitorovat případné strukturální defekty na těchto lopatkách. Zatím co ENV ani RMS neposkytují v tomto případě žádnou využitelnou informaci týkající se kavitace, vyhodnocení signálu metodou DAKEL NN přináší velmi zajímavé informace (obr. 6).



Obr. 5: Zpracovaný signál pomocí umělé inteligence z EDS TG2 se zachycením regulace výkonu – je vidět, že se při nižších výkonech objevují náznaky kavitace (červená stopa), současně se při přestavování objevuje žlutá stopa, která souvisí s mechanickým namáháním lopatek. Tyrkysová a zelená stopa zřejmě souvisí s průtokem vody

Pokročilá analýza ukazuje, že v určité fázi přestavování stroje dochází k silné kavitaci – červená stopa (TR2) a současně dochází k prudkému nárůstu TR8 (žlutá), které zřejmě souvisí s mechanickým namáháním.



Obr. 6: Srovnání vyhodnocení různých zdrojů signálu systémem DAKEL NN

Na obr. 7 je vidět srovnání různých zdrojů signálu a jejich vyhodnocení systémem DAKEL NN. Lze tím doložit, že různé zdroje signálu produkují různé stopy AE, na základě kterých, lze sledovat procesy probíhající v systému.

Digitální modely vodních strojů a jejich vztah k měřením AE a prediktivní údržbě

Monitoring akustiky a vibrací je součástí nastupujícího trendu digitalizace vodních elektráren, do kterého dále patří např. i predikce životnosti v závislosti na kumulovaném zatížení, tvorba digital twin (digitálního dvojčete stroje) pro sledování a predikci budoucího chování turbíny nebo spojení provozních charakteristik stroje s aktuálními parametry na energetické burze a s tím související inteligentní řízení stroje pro optimální zisk.

U každého stroje, který má být v pohotovostním stavu, musí být zajištěna i jeho údržba, která by měla být efektivní a spolehlivá s jistými prvky prediktivity. Nutným předpokladem je efektivní technická diagnostika. S rozvojem výpočetní techniky lze do technické diagnostiky snadněji nasazovat sofistikovanější metody například z oblasti metod umělé inteligence, včetně implementace do jednocelových mikrokontrolérů, které mohou snadno online monitorovat stav stroje. To je mimo jiné i v souladu s konceptem Průmysl 4.0. Tento koncept v první fázi přichází se shromažďováním více či méně užitečných dat pro potřeby prediktivní údržby. Vzhledem k jejich množství je vhodné pro jejich zpracování umělou inteligenci (UI).

Hlavním rozdílem a výhodou oproti klasickým metodám je schopnost učit se, tzn. na základě historických dat interpretovat symptomy k určení poruchy (klasifikace poruch) a její lokalizaci a následně na základě historických údajů a aktuálního vývoje predikovat budoucí stav. To ovšem předpokládá správný výběr učebních dat tak, aby zahrnovaly co nejvíce klasifikovaných situací.

Závěr

Vhodné měřicí zařízení spolu s pokročilými metodami vyhodnocení signálu AE je schopné indikovat míru kavitace na zařízení. Prostřednictvím těchto měření a jejich spojení s digitálním modelem je možné odhadnout míru vlivu na stroj. Význam systémů AE pro monitorování kavitace spočívá nejen ve včasném odhalení možných problémů, ale umožňuje nastavit optimální pracovní a provozní režimy reálných strojních zařízení.

Pravidelná měření AE při provozu stroje mohou predikovat vývoj stavu stroje. To umožní například omezit vznik poškození a závad způsobených kavitací. V praxi to napomáhá napláňovat výměnu dílů nebo upravit provozní režim stroje tak, aby se prodloužil interval mezi revizemi nebo opravami. Současně to umožňuje optimalizovat provozní režim u turbín nebo dlouhodobě běžících rotačních čerpadel s cílem, aby byl maximálně efektivní z hlediska výkonu a účinnosti.

Literatura

- [1] Koula, V., Šifner, J. (2019): *Zkouška využití diferenčních členů pro monitorování lopatek TG2 v elektrárně Dlouhé Stráně Období: 07/2019*. Technická zpráva, EDS-5b, DAKEL, Rpety.
- [2] Koula, V., Šifner, J., Pozdílek, M. (2020): *Pokročilá analýza signálu AE s využitím umělé inteligence*. Technická zpráva, DAKEL, Rpety.
- [3] Závorka, D., Rudolf, P., Habán, V. (2020): *Akustická diagnostika*. Závěrečná zpráva, Vysoké učení technické v Brně, Brno.

VYUŽITELNOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES TYPU „DRÁTOŘEZ“ PŘI VALIDACI SOFTWARE MODELUJÍCÍCH ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ

APPLICABILITY OF “WIRE-CAT” TYPE TEST BLOCKS FOR VALIDATION OF ULTRASONIC EVALUATION MODELING SOFTWARE

Petr Vlček a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s. r. o.

Abstrakt

Ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. (dále CVŘ) byl vyroben a ověřen nový typ zkušebních těles s realistickými defekty, který je vhodný kromě standardního využití při ověřování navrženého postupu ultrazvukového zkoušení pro použití zejména při ověření softwarových nástrojů modelujících ultrazvukové zkoušení. Nový typ zkušebních těles obsahuje vady, které jsou vyrobeny elektrojiskrovým obráběním pomocí drátu.

Aplikovatelnost tohoto typu zkušebních těles byla ověřena na cca 40 zkušebních tělesech z uhlíkové a austenitické oceli o dvou tloušťkách, kdy byly porovnávány výsledky dosažené při ultrazvukovém zkoušení technikou phased array a simulacích v softwaru CIVA.

V článku jsou uvedeny informace o výsledcích VaV projektu CVŘ řešeného v letech 2019-2020 v projektu NCK pro energetiku, dílčího projektu DP6 “Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“, pracovního balíčku PB1.14 „Perspektivní diagnostické metody“.

Abstract

A new type of test specimens with realistic defects was produced and verified in the Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) research organization. This type of test specimen is suitable for use in verifying the proposed ultrasonic testing procedure, but especially for verifying software tools for ultrasonic testing modeling. These test specimens contain defects which are produced by electro-spark machining with wire.

The possibilities of using this type of test specimens were verified on about 40 test specimens made of carbon and austenitic steel with two thicknesses, when the results obtained in ultrasonic testing by phased array technique and simulations in CIVA software were compared.

The paper provides information on the results of CVŘ R&D project solved in 2019-2020 within the NCK project for energy, sub-project DP6 “Development of diagnostic methods for characterization of key components of energy units”, work package PB1.14 “Perspective diagnostic methods”.

Nedestruktivní zkoušení a kvalifikace

Nedestruktivní zkoušení slouží k prokázání nebo zjištění stavu materiálu nebo zařízení bez nutnosti jeho poškození nebo jen s minimální vlivem na jeho stav, aby bylo možné ho dále v případě vyhovujícího stavu provozovat. V případě hodnocení podpovrchového stavu materiálu je často nutné pro přesnou interpretaci výsledků nedestruktivního zkoušení provést ověření pomocí měření na zkušebních tělesech. Tento postup se označuje jako kvalifikace nedestruktivního zkoušení.

Při kvalifikaci jednotlivých metod nedestruktivního zkoušení se používají zkušební tělesa (ZT), která obsahují uměle vyrobené vady. Zkoušení provedená na těchto tělesech, u kterých je

známa velikost a pozice vad, umožní vyhodnotit přesnost použité metody a zvoleného postupu nedestruktivního zkoušení.

Zkušební tělesa pro nedestruktivní zkoušení

Ultrazvukové zkoušení (UT) je jedna z metod nedestruktivního zkoušení, která je zaměřena na detekci a hodnocení rozměrů vad, které se nachází uvnitř materiálu a které často komunikují s povrchem na opačné straně, než z které je prováděno zkoušení. Současně jsou i výsledky této metody v některých případech obtížně reprodukovatelné, jelikož na výsledek má vliv velké množství faktorů. K tomu se v poslední době používají ještě nové techniky zkoušení (Total Focusing Method, Full Matrix Capture, guided wave atd.), při kterých je získáno velké množství dat a interpretace výsledků je náročnější.

Z tohoto důvodu se u této metody velmi často používá proces kvalifikace, který prověří, zda navržený postup, zařízení, a i personál je schopen správně vyhodnotit naměřená data ze zkoušené oblasti, a v požadované kvalitě. Z důvodu komplikovanosti UT a rozvoji IT technologií se součástí návrhu postupů ultrazvukového zkoušení stává i počítačové modelování.

Nedílnou součástí ověření inspekčního postupu je měření na zkušebních tělesech, která představují model zkoušené součásti, ve které jsou vyrobeny vady. Vady v ZT musí naplňovat několik základních podmínek s cílem co nejvíce odpovídat reálným vadám a rozměrově splňovat podmínky pro naplnění kvalifikačních kritérií pro UT.

Při návrhu a výrobě vad je snaha vyrobit v ZT co nejvíce realistické vady, u kterých je ale nutné znát přesné rozměry, aby bylo možné určit nepřesnost stanovenou při vyhodnocení zkoušení.

Zkušební tělesa „drátořez“

Zkušební tělesa „drátořez“ (dále ZT drátořez) jsou pro vybrané případy UT velmi vhodná zkušební tělesa, která naplňují požadavky pro kvalifikaci, tj. jsou u nich známy přesné rozměry vad a oproti základním typům vad jako jsou vývrty, drážky nebo poloeliptické vady, je možno je profilovat do tvaru odpovídající reálné únavové trhlině. Vadu lze umístit do libovolné pozice v ZT.

Výroba ZT drátořez je realizována pomocí elektroerozivního obrábění, při níž se materiál odebrá drobnými elektrickými výboji (jiskrami) mezi obrobkem (zkušebním tělesem) a elektrodou (nástrojem – drátem) v kapalném dielektriku.

Pro výrobu vady se používá pohybující se drát standardně o tloušťce od 0,1 mm. Při hloubení se elektroda (drát) pohybuje směrem do zkušebního tělesa až do chvíle, kdy přeskočí elektrický výboj. Každý výboj oddělí mikroskopický kus materiálu, který je odplaven dielektrikem. Tímto způsobem se drát postupně „prořezává“ materiálem podle přesně stanovené trajektorie. Tvar vady je definován pohybem drátu, kdy přes CNC řízení obráběcího stroje lze velmi přesně vyrobit téměř libovolný profil i velikost vady.

Hlavním omezením celého procesu je možnost výroby vad pouze do rovinných těles o omezené šířce a tím, že profil (výška) vady je po celé její délce stejný. Výhodou ZT drátořez je jejich snadná a levná výroba. Způsob výroby umožňuje vymodelovat tvar trhlin, jejichž výskyt je v kontrolované komponentě zjištěn nebo předpokládán. Oproti zkušebním tělesům s realistickými vadami je jejich výroba výrazně jednodušší a levnější.

ZT drátořez je nový mezistupeň zkušebních těles mezi ZT s reálnými vadami a ZT s umělými vadami, kdy je možné získat při ultrazvukové kontrole těchto ZT velmi přesnou představu charakteru odezvy od reálných trhlin. Díky přesné znalosti profilu vady je možné provádět i ověření (validace) výpočtových softwarů modelující ultrazvukové zkoušení.

V roce 2020 byl společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. typ ZT „drátořez“ zapsán jako užitečný vzor – „Zkušební těleso s přesnými tvary trhlin pro nedestruktivní zkoušení“ č. 34 208.

Validace softwaru CIVA pomocí zkušebních těles „drátořez“

V rámci projektu NCK PB 1.14 „Perspektivní diagnostické metody“ byly v bodu 1.14.1 provedena měření na zkušebních tělesech reprezentujících tvar reálné provozní vady a simulace v programu CIVA s cílem ověřit výpočtový software pro použití při UT. V rámci optimalizace výsledků simulace byly definovány i parametry, které významně ovlivňují shodu mezi výsledky měření a simulací.

Simulace ultrazvukového zkoušení bylo provedeno v softwarové platformě CIVA, která je vyvíjena a distribuována francouzskou firmou EXTENDE ve spolupráci s dalšími partnery jako CEA. Jedná se o celosvětově nejrozšířenější program pro modelování vybraných metod nedestruktivního zkoušení.

Experimentální měření

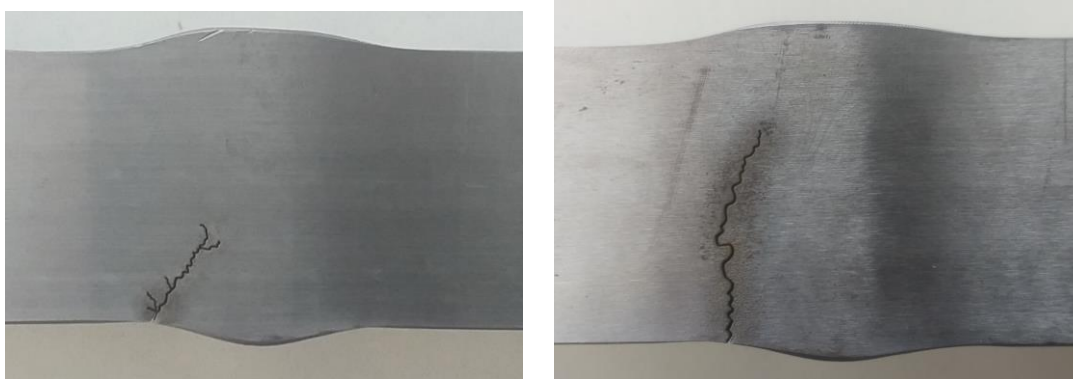
Měření a simulace byly provedeny na 44 zkušebních tělesech drátořez vyrobených z feritického a austenitického materiálu a na 2 referenčních měrkách. Měrky i ZT drátořez byly vyrobeny z materiálů, jejichž použití je běžné na jaderných elektrárnách typu VVER, tj. feritická ocel 12022.1 (ekvivalent 22K) a austenitická ocel X6CrNiTi18-10 (1.4541) (ekvivalent 08CH18N10T).

ZT drátořez byla rovinná tělesa o tloušťkách 12 a 35 mm, kdy polovina ZT drátořez byla homogenních a polovina se svarovým spojem (příklad ZT je na obr. 1). Vady byly navrženy podle nálezů a zdokumentování reálných trhlin, tj. jejich profilu a směru šíření v materiálu. Vady byly v programu CIVA modelovány jako rovinné s lomených profilem nebo i větvené (obr. 2).

Pro porovnání simulace a měření byly vybrány základní lineární phased array sondy AM 3,5 MHz a AS 5 MHz s klíny pro příčné vlny. Měření probíhalo pohybem sondy po celé délce ZT, pokud to umožnila koruna svaru.



Obr. 1: Boční pohled na ZT drátořez



Obr. 2: Ukázka vad vyrobených do zkušebních těles

Výsledky zkoušení

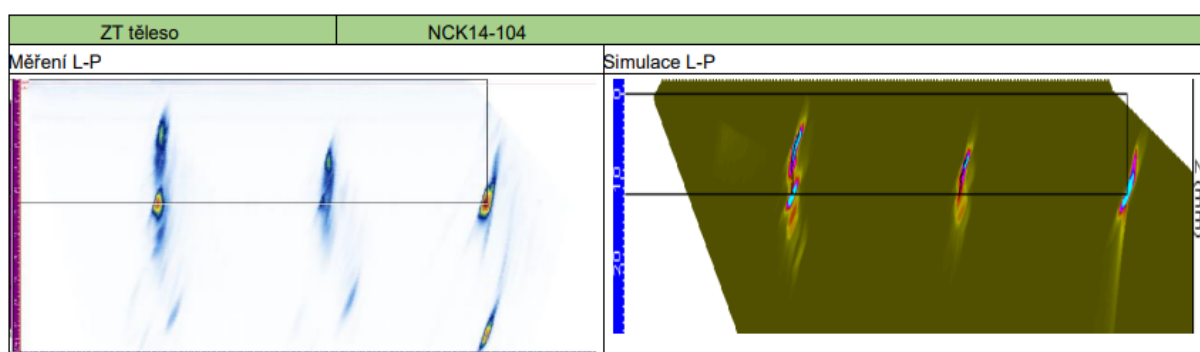
Porovnání výsledků zkoušení a simulací bylo prováděno několika způsoby. Základním hodnocením bylo porovnání hodnot maximální odezvy získané při pohybu sondy po tělese v axiálním směru. Druhým kritériálním hlediskem bylo porovnání celkové charakteristiky odezvy (tvar a profil zobrazených ech) v zobrazení Merged B-scan (boční pohled na ZT).

V případě zjištění odchylky mezi výsledky simulace a měření bylo provedeno detailní posouzení odezev získaných při simulaci a zkoušení, a to porovnáním pozice sondy a charakteristiky max. odezvy simulace a měření. V případě, že nebyla zjištěna příčina v geometrii ZT a modelu, bylo provedeno posouzení vlivu výpočetních parametrů v programu CIVA na výsledek.

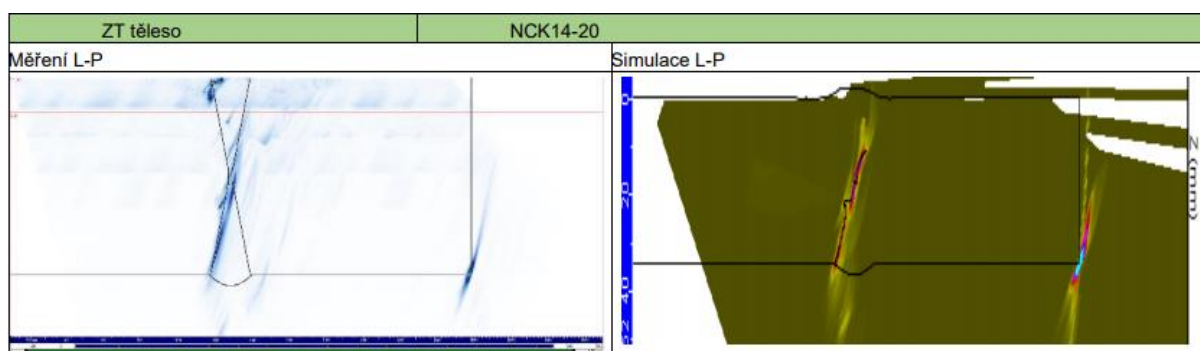
Dosažené výsledky byly závislé na materiálu, tloušťce a také výskytu svarového spoje v ZT, který měl vliv na přesnost modelování geometrie i materiálových vlastností zkušební tělesa.

Charakteristika odezvy od vad získaných při simulaci a phased array zkoušení byla získána u zkušebních těles bez svaru velmi obdobná ne-li až totožná (obr. 3 – zobrazené odezvy od vad v „bočním pohledu“). Rozdíly byly zjištěny v případě zkoušení a simulace ZT se svarovým spojem, a to zejména u austenitických těles, která měla z výroby výraznou korunu i kořen svaru.

U feritických těles byly koruna i kořen svaru nevýrazné, což umožnilo získat shodné výsledky mezi simulací i měřením i při skenování přes svarový spoj (obr. 4). U austenitických zkušebních těles se svarem bylo provedeno měření a vyhodnocení dat pouze ke koruně svaru, jak je standardně prováděno při ultrazvukovém zkoušení.



Obr. 3: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace na ZT NCK14-104 – ZT austenitické bez svaru o tloušťce 12 mm (zobrazení Merged S-Scan)



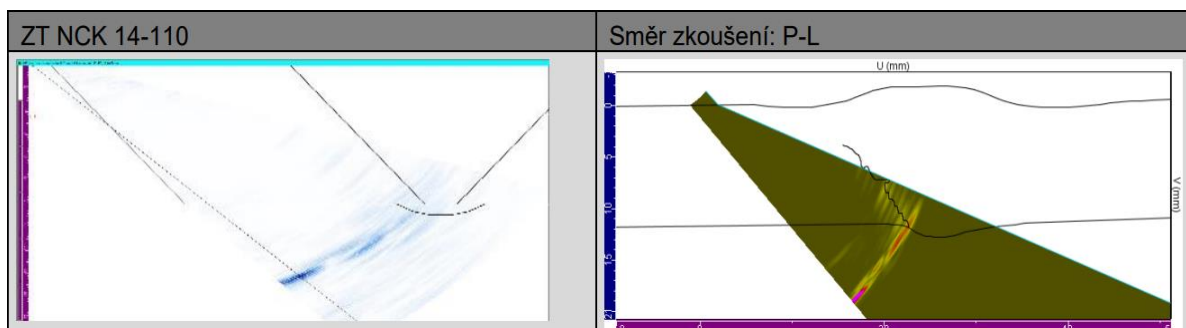
Obr. 4: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace na ZT NCK14-20 – ZT feritické se svarem o tloušťce 35 mm (zobrazení Merged S-Scan)

V případě hodnocení intenzity odezvy u ZT, které jsou vyrobeny z oceli 12022.1, bylo možné díky nevýrazné a tvarově pravidelné koruně provést a porovnat i výsledky zkoušení a simulace při pohybu přes svar. Výsledky intenzit odezev získaných při simulaci jsou kromě několika případů ve shodě se zkoušením, tj. do rozdílu ± 3 dB. Rozdíly mezi simulací a zkoušením je převážně dáno vlivem geometrie kořene a potenciálně i koruny.

U austenitických zkušebních těles se významněji projevuje vliv a požadavky na nastavení vlastností materiálu v modelu ZT, a to zejména v případě výskytu svarového spoje.

Intenzity odezev od vad získaných při základní simulaci v porovnání s UT u austenitických zkušebních těles o tloušťce 12 mm dosahovaly velkého rozptylu hodnot, a to zejména u těles se svarem. Na základě analýzy parametrů ovlivňující simulaci/zkoušení a u ZT se svarem bylo provedeno hodnocení vad pouze při pohybu sondy ke svaru (obr. 5), byly získány již vyhovující výsledky mezi simulací a zkoušením, tj. do rozdílu ± 6 dB.

U zkušebních těles o tloušťce 35 mm prvotní výsledky mezi zkoušením a simulacemi vyšly diametrálně odlišně. Bylo provedeno stanovení útlumu pro jednotlivá ZT a zjištěno, že útlum se u jednotlivých ZT liší. Na základě optimalizování výsledků simulací došlo k zvýšení shody mezi výsledky v případě hodnocení vady na přilehlé straně svaru. Byly zde získány i výsledky, u kterých ani po detailní analýze dat nebyla určena příčina rozdílného výsledku. Důvodem jsou pravděpodobně nehomogenity austenitického materiálu, které nebylo možné bez metalografického posouzení svaru a tepelně ovlivněné oblasti odpovídajícím způsobem stanovit a pokusit se modelovat při výpočetním stanovení odezvy v programu CIVA.



Obr. 5: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace austenitického ZT se svarem o tloušťce 12 mm – vyhodnocení dat pro vybranou pozici sondy pomocí zobrazení S-scan

Výsledky ukázaly nutnost prověřovat ultrazvukové parametry pro jednotlivá tělesa, aby bylo možno provést vhodné nastavení nejen pro porovnání se simulací.

Shrnutí výsledků

Výsledky ukázaly, že shoda mezi charakteristikami (tvarem) odezev od vad je u většiny měřených ZT drátorez velká. To je umožněno přesným vymodelováním vady i modelem ZT (u ZT bez svarového spoje) a homogenním materiálem. U ZT se svarem vyrobených z oceli 12022, kdy geometrie koruny a kořene svaru byly nevýrazné a plynulé, byla dosažena též velká shoda ve výsledcích.

Jako problematická ZT pro interpretaci výsledků a dosažení shody mezi simulací a měřením byla silnostěnná austenitická tělesa se svarem, kdy vlivem proměnlivosti struktury materiálu a velkého útlumu ultrazvukového signálu nebyla ve většině případů získána shoda mezi výsledky simulace a měřením.

Výsledky jsou souhrnně uvedeny v tab. 1, kdy bylo provedeno posouzení shody v intenzitě odezev mezi simulací a UT podle následujících kritérií: shoda – do rozdílu ± 3 dB, přípustná odchylka – do rozdílu ± 6 dB, zdůvodnitelná – do rozdílu ± 12 dB, nepřípustná – rozdíl 12 a větší. V případě rozdílu větší než 6 dB byly výsledky z ultrazvukového zkoušení a simulace analyzovány a hledána příčina rozdílu.

Tab. 1: Přehled dosažených výsledků při porovnání maximální odezvy mezi simulací a UT

Materiál ZT	Tloušťka ZT	Typ ZT	Počet hodnocení (P. h.)	Shoda		Přípustná odchylka		Zdůvodnitelná odchylka		Nepřípustná odchylka	
				P.h.	%	P.h.	%	P.h.	%	P.h.	%
12022	12	hom	20	20	100	0	0	0	0	0	0
12022	12	svar	10*	8	80	2	20	0	0	0	0
12022	35	hom	10	6	60	3	30	1	10	0	0
12022	35	svar	10*	9	90	1	10	0	0	0	0
X6CrNiTi18	12	hom	20	16	80	4	20	0	0	0	0
X6CrNiTi18	12	svar**	10*	5	50	1	10	0	0	4	40
X6CrNiTi18	35	hom	10	6	60	3	30	1	10	0	0
X6CrNiTi18	35	svar**	10*	3	30	0	0	0	0	7	70
Celkem			100*	73	73	14	14	2	2	11	11
Pozn.: *z hodnocení jsou vyřazeny vývrty, které se nacházejí v ose svaru. Nejsou předmětem validace a vliv geometrie svaru má zásadní vliv na detekci. ** u austenitických ZT je velký vliv geometrie koruny, a proto bylo provedeno měření pouze k koruně svaru											

Závěr

Pro ověření použitelnosti a schopnosti predikovat odezvu od vad vyrobených na ZT drátořez bylo navrženo a vyrobeno celkem 44 zkušebních těles z feritické oceli 12022.1 (ekvivalent 22K) a austenitické oceli X6CrNiTi18-10. Byla provedena simulace a následně i optimalizace simulace ultrazvukového zkoušení za účelem dosáhnout maximální shody mezi simulací a laboratorními zkouškami na ZT drátořez.

Na základě dosažených výsledků bylo prokázáno, že softwarová platforma CIVA umožňuje velmi dobře modelovat ultrazvukové zkoušení a že zkušební tělesa drátořez, ve kterých byly vyrobeny vady simulující reálné trhliny, jsou velmi vhodný typ zkušebních těles pro ověřování softwarových nástrojů.

Kromě této činnosti mohou být využity pro optimalizaci inspekčních postupů v rámci kvalifikace NDT, kvalifikace personálu a pomoci při interpretaci výsledků UT.

Předložený článek vznikl díky projektu podporovaného Technologickou agenturou České republiky TN01000007 v rámci Programu Národní centra kompetence – 1. VS.

ECOL LUBRICATION MANAGEMENT V ENERGETICE – OUTSOURCING SERVISU MAZÁNÍ V SOULADU S ICML 55.1

ECOL LUBRICATION MANAGEMENT IN POWER GENERATION – LUBRICATION MANAGEMENT OUTSOURCING IN COMPLIANCE TO ICML 55.1

Tomáš Klíma, Dušan Prostřední a Wojciech Majka

Ecol Industrial s.r.o., Ecol Sp. z o.o.

Abstrakt

LUBRICATION MANAGEMENT je důležitou součástí správy majetku a celého Asset Managementu v průmyslovém podniku, kde je velká část výrobního zařízení mazána, chlazena, konzervována, hydraulicky ovládána apod. V současné době sledujeme snahy o uchopení filosofie průmyslu 4.0 a její implementace do provozování a údržby strojů. Cílem je efektivní správa majetku s vysokou spolehlivostí zařízení a minimalizace nákladů na opravy a údržbu. Nebo možná přesněji efektivního vynakládání nákladů na údržbu s cílem vysoké spolehlivosti a minimem neplánovaných oprav a oprav, kterým se dá předejít aktivní údržbou.

S ohledem na vysokou přesnost výroby strojů, minimem tolerancí a vůlí strojních součástí, tlakem na maximální výkon dochází v neustále k vývoji maziv a olejů splňující tyto nároky, technik mazání a aplikací a také k jejich diagnostice. Pojem mazání strojů v podniku tak dnes neznamená jen výběr vhodného maziva dle doporučení výrobce, jeho správné doplňování a plnění mazacích plánů. V neposlední řadě je tu výzva na snižování emisí uhlíku a zřejmě novou generaci maziv s cílem maximální životnosti maziv a také maziv snižujících tření spořících energie a paliva.



Obr. 1: Lubrication Management v elektrárně s výčtem obsluhovaných mazacích míst

V tomto příspěvku bude představen koncept outsourcingu mazání neboli Lubrication Managementu jako součástí Asset Managementu v souladu se standardem ICML 55.1. Standard, který pojmenovává všechny aspekty komplexního řešení mazacích činností a zejména činností souvisejících. Za vznik tohoto standartu vděčíme široké skupině profesionálů z oblasti tribotechniky, jenž sdružuje asociace ICML (International Council for Machinery Lubrication). Na reálných příkladech z jednotlivých středisek Ecol Lubrication Managementu (zejména elektráren a rafinerií) bude koncept managementu mazání představen a prezentován.

Abstract

LUBRICATION MANAGEMENT is important part of complete Asset Management in industrial plant, where major part of machinery is lubricated, cooled, preserved, moved by hydraulic, etc. Nowadays we observe many efforts in Industry 4.0 and Maintenance 4.0 implementation in industrial plants. The goal is the Condition Based Maintenance with high machine efficiency and availability with minimum costs for repairs and zero unscheduled downtime.

Reflecting high machine production accuracy and minimal clearance in lubricated components with high machine load, the lubricants are constantly developed to fulfil these requirements. As well as the lubrication techniques and lubricant diagnostic. Lubrication in industrial plant is nowadays not only the right lubricant selection acc. to OEMs, its proper lubrication and fulfilling OEM lubrication plans. Last but not least, there is a challenge in CO2 reduction attempt and most probably new generation of lubricants with the long-life aspects and reduced friction to minimize consumption of energy and fuels.

In this article the concept of lubrication management outsourcing is introduced as part of Asset Management with compliance to ICML 55.1 standard. Standard that names and introduces all aspects of lubrication activities and areas as complex. For existing of this standard, we thanks to wide group of lubrication engineers and specialists from International Council of Machinery Lubrication – ICML. On real cases from selected Ecol Lubrication Management departments (mostly power plants and refineries) the concept of lubrication management outsourcing will be introduced and presented.

LUBRICATION MANAGEMENT



Obr. 2: Soubor oblastí patřících k managementu mazání dle ICML (International Council of Machinery Lubrication)

Asset Managementu se věnuje řada pozornosti, a to v mnoha podobách a formách, jako může být „Total Quality Management“ nebo „Reliability Centered Maintenance“ a formách podobných, které se zaměřují na podobnou oblast. Norma ISO 55000 je z pohledu mazacích činností a tribotechniky velmi obecná a doplňuje ji dokument ICML 55.1, který hovoří o 12 programových oblastech. Nejde tedy jen o samotné promazání stroje a spokojit se se rčením „kdo maže, ten jede“.

Činnost mazání se zdá být jednoduchou činností. Namazáním strojní součásti za účelem snížení tření, odvádění teploty, ochrany proti korozi apod. Samotný výkon zpravidla svěřujeme pracovníkům údržby nebo obsluhy. Mazání čerpadel čerpadlářům, ložisek elektromotoru elektrikářům, motor motorářům, armaturu armaturářům a stejně tak jiným profesím, kteří s větší, či menší péčí, se těmto činnostem věnují. V některých případech je na to v podniku dedikovaný tým pracovníků mazačů.

Mají tyto profesionálové vliv na výběr maziva nebo je tato činnost svěřena hlavnímu tribotechnikovi nebo samotnému oddělení nákupu? Jsou tyto lidé pravidelně školeni v oblasti tribotechniky, jsou odběry vzorků olejů a maziv odebírány tou nejlepší technikou, aby rozbor oleje byl vypovídající? Do jaké míry je celý tým těchto specialistů, techniků, inženýrů řízen v případě řešení

problému konkrétního stroje, selhání zařízení nebo dílčího komponentu? Jak spolu komunikují při výběru vhodného maziva nebo do jaké míry se mohou podílet svými zkušenostmi na výběru nového stroje nebo jeho modernizace?

Zpravidla se dostávají ke slovu až při samotné údržbě a s jednotlivými obtížemi údržby se smíří nebo je těžko mění (vhodnost oleje nebo maziva; odběrná místa vzorků; dostupnost k zařízení při jeho údržbě příp. výměně maziva; osazení stroje senzory vibrací, olejů, teplot apod.). **Velmi často jsou tyto činnosti podceňované a vykonávané nedostatečně. Pozornost je obvykle věnována pouze klíčovým strojům, přičemž o ostatní zařízení se pečuje neekonomicky.**

Lubrication management – soubor činností mazání a tribotechniky vnímáme v Ecolu jako činnosti komplexní. Z pohledu téměř 30-letých zkušeností v této oblasti (zejména energetiky) a dle nově představeného standardu ICML 55.1 se jedná o soubor činností a aspektů viz obr. 1. Soubor těchto uvedených činností a aspektů je konceptem, programem nebo možná filozofií.

Ecol Lubrication Management

Zkušenosti Ecol v outsourcingu mazání sahají do roku 1991, kdy tyto činnosti byly v uhelné elektrárně Rybník (8x200 MWe) outsourcovány v rámci restrukturalizace podniku. Od té doby Ecol rozvíjel vlastní program řízení mazacích služeb. Vysvědčením Ecolu je dnes 22+ středisek s outsourcovaným servisem mazání, 170 pracovníků v této divizi služeb, 28 tis. ks strojního zařízení (kotle, turbíny, ventilátory, čerpadla, kompresory, armatury, hydrauliky atd.), přes 65 tis. dílčích mazacích uzlů dlouhodobě servisovaných v rámci outsourcingu. Z pohledu maziv více než 4000 tis. tun maziv v provozu, více než 300 tis. mazacích úkonů ročně. Nejedná se o převzetí běžně prováděných mazacích činností podle mazacích plánů strojů svěřených do jiných rukou. Ecol Lubrication Management je know-how s pevnou strukturou činností, znalostí, které se neustále vyvíjí a odpovídají na nové výzvy provozu, údržby, průmyslu 4.0 a narůstajících požadavků zákazníků. Hlavními pilíři je know-how pracovníků, 30leté zkušenosti, neustálé sledování vývoje tribotechniky, měřících metod, digitalizace – online senzorů, sběr a vyhodnocování dat, ohled na environmentální výzvy, v neposlední řadě řízení a hodnocení celého procesu.



Obr. 3: Realizace mazacích činností jako jedné ze součástí Lubrication Managementu

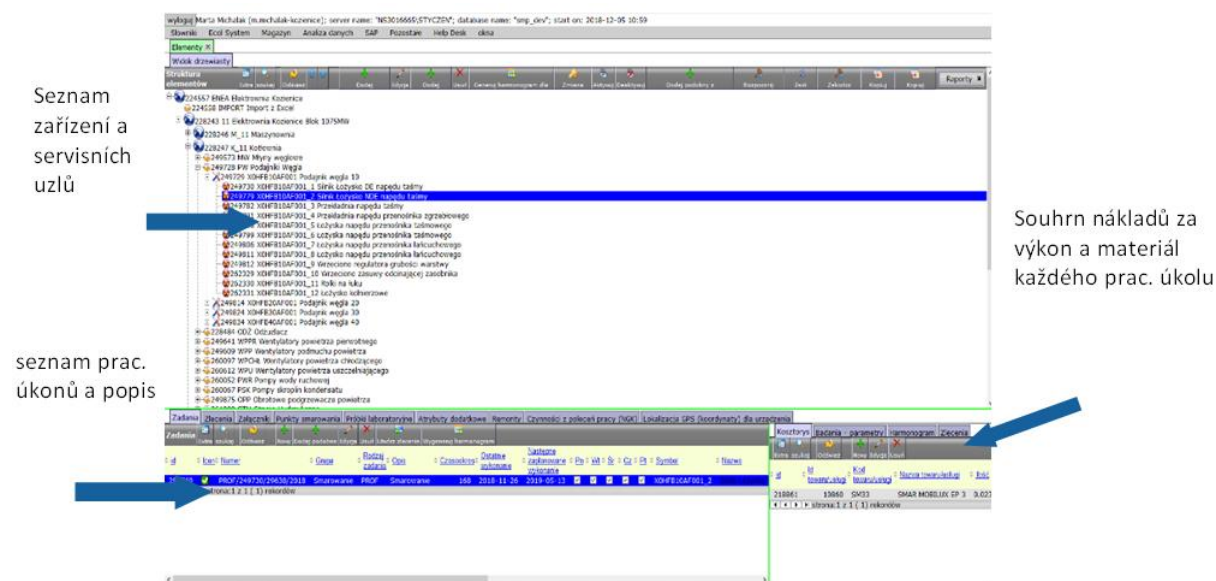
Audit mazacích služeb v podniku

Základem takového outsourcingu v podniku je audit u zákazníka, který umožní zjistit rozsah celého projektu, poskytnout znalosti, jakou formou a jakým způsobem je řízen a vykonáván systém mazání v daném provozu. Výsledek auditu je potom komplexní posouzení současně prováděných činností mazání. Audit umožní porovnání „benchmarking“ s naším konceptem

Lubrication Managementu a nasbíranými zkušenostmi v odvětví energetiky (Best Lubrication Practices). ICML 55.1 je dokument, který může být návodem klientovi pro zadání takového auditu.

Výsledek auditu – návrh řešení

Návrh řešení Lubrication Managementu je zpracován a představen zákazníkovi včetně podrobného rozsahu služeb, personálního obsazení, skladovacích prostor, zajištění distribuce maziv, poskytnutého vybavení a diagnostiky a v neposlední řadě úrovně komunikace, reportingu. Výsledky jsou konzultovány se zadavatelem a na základě těchto znalostí přestaven zákazníkovi model spolupráce s definováním rozsahu nabízených služeb. Kromě samotného rozsahu nabízených služeb je zákazníkovi představen struktura a používání Ecol CMMS systému a jeho přínosy.



Obr. 4: Ukázka vlastního funkčního software EcolSystem pro řízení mazacích činností

Digitalizace – údržba 4.0

Jednou z klíčových aktivit zahájení outsourcingu mazání je revize zařízení a všech mazacích míst a uzlů, specifik zařízení. Následně přenesení těchto dat do EcolSystem CMMS řídicího programu. Toto vlastní IT řešení je vlastním softwarem Ecol, který existuje již řadu let. Vzhledem k rychlé digitalizaci a potřebám uživatelů je software šitý na míru a neustále vyvíjen skupinou 4 IT specialistů.

EcolSystem CMMS je uspořádaný systém, se kterým pracuje každé středisko údržby, kde slouží k přehlednému plánování mazacích činností a údržby. U každého zařízení s jedním nebo několika mazacími uzly, přehledně popsány, s doprovodnou fotografií, je uveden přehled o plánovaných činnostech, technické dokumentaci, mazacích plánech, výsledcích tribodiagnostiky, typu maziva nebo např. spotřebované mazivo konkrétních mazacích uzlů.

Jednotlivý úkon údržby (doplnění, výměna maziva nebo odběr vzorku) je softwarem generován a řádně popsán pracovním úkolem.

Vedle řádného označování mazacích uzlů KKS kódy jsou mazací uzly označeny čárovým kódem, resp. dnes převážně již NFC čipem. NFC čipem a kódem jsou pak v návaznosti označovány používané oleje, odebírané vzorky olejů, maziva, která jsou doplňována. To nám umožňuje sledovat vzorek oleje od vlastního odběru až k vygenerování protokolu o zkoušce. Nebo

mazivo/olej určený k doplnění až po online zápis množství doplněného maziva k jednotlivým mazacím uzlům. S RFID, NFC čipy a kódy pracuje následně naše laboratoř, sklad maziv i mazací technik, který díky smartphonu propojeného s EcolSystem softwarem má vše na jednom místě a všechna data při výkonu úkolu zadává online do systému.



Obr. 5: Ukázka štítků, RFID a NFC prvků pro online zprávu a realizaci mazacích činností

Velkým rozvojem prošli i jednotlivé senzory. S hlediska tribotechniky jsou to senzory sledující online čistotu oleje, obsah vody, otěrové kovy, TAN, antioxidanty apod. Jejich využití v údržbě je velmi přínosné a sledování trendů je skvělým nástrojem údržby a provozu zároveň. Pravidelná diagnostika olejů a maziv, online senzory a sledování trendů měřených parametrů jsou bohatým zdrojem informací pro řešení problému – „troubleshooting“.

Tribodiagnostika

Nezávislá akreditovaná laboratoř Ecol je moderní laboratoř vybavenou nejnovější laboratorní technikou pro měření provozních parametrů olejů a maziv. Vedle dnes základních testů viskozity, čistoty oleje, IČ spektra a dalších základních testů v laboratoři provádíme ve velkém měřítku měření aditiv – RULER, oxidačních produktů – MPC, oxidační stability – RPVOT, ale i testy jako jsou TOST Test nebo In-House testy oxidační stability olejů od různých výrobců pro různé aplikace. To nám umožňuje i výběr oleje s vysokou oxidační stabilitou hodnocenou vlastním testováním, nikoliv jen tabulkovými parametry výrobců maziv.

K plnému portfoliu laboratoře patří testování transformátorových olejů s testováním izolačních vlastností trafo olejů, jejich provozních parametrů jako je např. obsah inhibitorů, rezistivity, permitivity, ale i kondice transformátorů diagnostikou rozpuštěných plynů DGA. Tím lze vysledovat v raném stádiu jednotlivé typy závad transformátoru.

Mimořádným vybavením v Ecol laboratoři je měřicí jednotka Grease Thief, kde velmi malý vzorek (1 gram plastického maziva) odebraného z valivého ložiska je testován automaticky. Jde o testování dynamické konzistence maziva Grease Thief Die Extrusion Test, jenž je velmi důležitým provozním parametrem pro zachování mazivostních vlastností náplně. Vedle toho jednotka Grease Thief měří obsah nečistot tohoto malého vzorku maziva a obsahu feromagnetických částic. Dále je pak vzorek maziva automaticky připraven na dílčí měření ostatních parametrů, jako je RULER pro stanovení obsahu aditiv, IČ spektra a dalších testů sledujících kondici maziva.

Tribodiagnostika olejů i maziv je nejen stanovením jakosti provozovaného oleje, kapalin a plastického maziva (vazelíny), ale zejména nosičem informací o kondici strojů a mazaných součástí, třecích uzlů. To je cenným nástrojem prediktivní a proaktivní údržby.



Literatura

- [1] Majka, W., Klíma, T.: *Interní materiály, dokumenty a fotografie Ecol Sp. z o.o., Ecol Industrial s.r.o.*
- [2] Hiller, P. (2020): *Why and How to Earn an MLE Certification*. Machinery Lubrication, No. 4/2020, [online]. Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31845/earn-mle-certification>
- [3] Hiller, P. (2019): *ICML Introduces New Certification, Asset Management Standards*. Machinery Lubrication, No. 6/2019 [online]. Available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31547/certification-asset-management-standards>
- [4] Klíma, T. (2013): *Outsourcing mazání v podniku (elektrárny, rafinerie, průmysl). 20leté zkušenosti a postřehy*. Řízení & Údržba průmyslového podniku, č. 9/2013.

PŘÍČINY SELHÁNÍ UTĚSNĚNÍ VYHRAZENÝCH TLAKOVÝCH ZAŘÍZENÍ

Jiří Lukavský ^{a)} a Jan Tomáš ^{b)}

^{a)} České vysoké učení technické v Praze

^{b)} TECHSEAL s.r.o.

Tlaková zařízení ve formě tlakových nádob, jejich částí zásobníků, potrubí a potrubních sítí jsou používány v mnohých odvětvích průmyslu a podle jejich parametrů, konstrukce, materiálu a dalších strojních součástí jako funkčních vestaveb, armatur, čerpadel, kompresorů a umístění v prostoru se liší požadavky na tato zařízení a jeho části. Největší nároky na celý problém lze očekávat u tzv. procesního inženýrství (chemická a petrochemická zařízení, jaderná energetika). O něco menší problémy má běžná energetika a teplárenství, rozvody tlakového vzduchu, plynovody a rozvody kapalin uložené v zemi nebo na potrubních mostech aj.

Ohrožení tlakových zařízení a jejich působení na životy a zdraví obsluhy, příp. na životní prostředí je obsahem analýzy jevů, které tato ohrožení vyvolávají. Odchytky od určujícího provozu, který je dán provozními parametry, mohou vést k náhlým selháním „stěny odolávající tlaku“, zpravidla selháním technických nebo organizačních opatření nebo selháním bezpečnostně kontrolních vybavení. Ta slouží k ochraně před překročením mezí, a která obsahují zařízení k bezprostřednímu omezení tlaku, jako např. pojistné ventily, pojistné membrány, pruty namáhané na vzpěr, řízená bezpečnostní zařízení nebo omezovací zařízení působící jako korekční přístroje nebo vyvolávají vypojení a uzavření, jako vypínače tlaku a teploty, nebo hladinové spínače.

Provozní bezpečnost ovlivňují rovněž časově závislá poškození, jako např. korozi (vnitřní, vnější, různé mechanismy koroze), erozi, kavitaci, únavou, křehnutím, tažností na mezi pevnosti v tečení, střídavým zatížením (tlakové / teplotní změny), vnější síly (prouděním tekutin, různou teplotní roztažností, větrem, seismicitou aj.).

Při úniku médií mohou vzniknout pro zaměstnance nebo pro třetí osoby ohrožení impulzem z volného proudu, potlačení, naleptání, hoření nebo zamrznutím. U částí zařízení, která jsou trvale technicky těsná, nečeká se únik těsněných látek. Tím neexistuje nebezpečí ohně, exploze nebo zdraví. U zařízení, která jsou technicky těsná, lze očekávat volné úniky netěsností pouze zřídka. Naopak technicky těsné spoje mohou být za určitých okolností netěsné.

Tlaková zařízení jsou vesměs komplikované konstrukce, kde jejich jednotlivé části jsou spojovány nerozebíratelnými (svarovými) nebo rozebíratelnými (šroubovými) spoji. Uvedené spoje mají řadu omezení ovlivňující parametry provozu, které jsou:

Možné ohrožení odchylkami od dovolených provozních parametrů a jejich příčinou mohou být:

1. Překročení dovolených pracovních tlaků v důsledku:

- a) vzrůstu tlaku vyšším potenciálem tlaku v připojených zařízeních, např. v okruhu sítě, v předlohách příp. v zásobních nádržích,
- b) selhání chlazení, příp. kontroly teploty,
- c) přeplnění překročením dovoleného plnicího tlaku (např. čerpadlem),
- d) překročení dovoleného plnicího tlaku (např. kompresorem),
- e) bránění teplotní roztažnosti z kapalin nebo plynů v kapalně fázi uzavřených v částech zařízení,
- f) uzavřené nebo ucpané odvětrávací potrubí,
- g) doprava tekutin proti uzavřené armatuře,
- h) výpadek kondenzace par,

- i) výpadek příp. selhání řídicích nebo regulačních zařízení,
- j) působení tepla zvnějška požárem,
- k) exotermní chemickou reakcí nebo rozpadovou reakcí,
- l) fyzikální explozí, která může vzniknout při styku studených kapalin s teplou taveninou nebo kapalinou, jejíž teplota leží nad teplotou varu studené kapaliny (např. kovové lázně, organické teplotnosné oleje),
- m) tlakové rázy, např. rázy kapalin s kavitací.

2. Nedosažení dovoleného tlaku v důsledku:

- a) ochlazení kapalin,
- b) při kondenzaci par, zanesení filtrů na straně sání,
- c) při vyprazdňování tlakového zařízení.

3. Při překročení dovolené provozní teploty:

- a) výpadkem chlazení, např. při chybném měření teploty a množstvím nástřiku,
- b) exotermní reakcí.

4. Nedosažení dovolené provozní teploty v důsledku:

- a) přechodu odparek s hluboko ochlazenými zkapalněnými plyny,
- b) adiabatickým uvolněním plynů (např. u kyselin uhličitých, zkapalněných plynů, čpavku atd.

5. Překročení dovolených mechanických zatížení materiálů v důsledku:

- a) vnějších sil a momentů na nosných částech a hrdlech,
- b) ve stěně nesoucích tlak nedovoleným rozdílem teplot a teplotních gradientů,
- c) nedovolených rychlostních změn teploty, zejména při najíždění a odstavení,
- d) bránění teplotní roztažnosti při změnách teplot, např. při najíždění a odstavení,
- e) kolísání teplot u části zařízení,
- f) zpětného rázu při odlehčení tlaku.

6. Selhání bezpečnostně závažného vybavení v důsledku:

- a) narušení funkčnosti provozním médiem, nebo způsobem provozování pro slepení, zanesení nebo korozi bezpečnostních ventilů, pojistných membrán, senzorů a převodů měřících zařízení, bezpečnostně závažných armatur,
- b) narušení funkčnosti zachycováním kondenzátu na nejnižších místech výfukového potrubí z pojistných ventilů.

7. Narušení funkčnosti vnějšími vlivy, jako:

- a) korozi z vnějška,
- b) znečištěním nebo nánosy,
- c) výpadkem dodávky energií,
- d) poškození působením násilí,
- e) kmitáním nebo vibrací ze zdrojů okolí,
- f) namrzáním, pokrytí ledem.

8. Narušení funkčnosti:

- a) nesprávnou manipulací jako přestavením mezních hodnot,
- b) nesprávnými údržbářskými zákroky, jako např. záměnou při opravě.

9. Při montáži, instalaci a vybavení tlakového zařízení mohou být cíleně provedena následující opatření:

Montáž potrubí by měla být provedena tak, aby se jeho umístění při pozdějším provozu nedovoleně neměnilo, když

- a) je třeba vzít ohled na teplotní dilataci při instalaci a delší potrubí mezi pevnými uchyceními vybavilo kompenzačními prvky jako kompenzátory, kompenzačními útvary potrubí, pokud vedení potrubí neumožňuje dostatečné prodloužení,
- b) nadzemní potrubí dosedá na dostatečný počet hrdel nebo konstrukce uchycení (potrubní mosty, nosné konstrukce) a to je pak upevněno tak, že nemůže vzniknout nebezpečná změna polohy,
- c) potrubí uložené v zemi jsou pokládána tak, aby ležela rovnoměrně,
- d) vytvoří se pevná a kluzná uložení,
- e) použité armatury budou uchyceny tak, aby nezatížily vlastní tíhou příp. akčními silami potrubí; armatury, tvarovky, čerpadla by neměla být zatížena momenty nebo smykovými silami.

Uzavírací součásti mají být zabezpečena proti náhodnému uzavření, přestavbě nebo uvedení do činnosti.

U uzavíracích částí tlakových zařízení, v nichž je možný vzrůst tlaku bránícím teplotnímu prodloužení kapalinami nebo zkapalněnými plyny se použijí vhodná opatření, např.

- a) vybaví se zpětnými ventily nebo zařízením pro odlehčení tlaku,
- b) zablokováním armatur v otevřené poloze.

Nedovolený růst tlaku se omezuje u tlakově zkapalněných plynů chladícími prostředky, u nichž tlak bez objemového odlehčení sleduje zákonitost tlakové křivky páry.

Části zařízení, které jsou provozovány plyny nebo parami s kondenzovatelnými podíly, zejména parní stroje, parní turbíny a potrubí jsou odvodněny a v případě potřeby předebrány, aby se zabránilo rázům kapaliny.

Kompresorové stanice, vyjmuté ze směrnice pro tlaková zařízení, jsou vybaveny částmi s bezpečnostní funkcí zabraňujícími během dopravy nebo čerpací přestávky nedovoleným tlakům.

Dodržení dovolených pracovních parametrů u chemických reakcí se zaručuje částmi výbavy se zabezpečenou funkcí jako např.

- a) jsou vyloučeny chyby dávkování čerpadly s definovanou rychlostí,
- b) zařízením pro měření množství v přívodu nebo měřením výšky hladiny, které při dosažení definované mezní hodnoty spustí automaticky působící zákroky, např. uzavření přívodu apod.,
- c) nuceně spojenými přítoky provozních látek.

Akumulace nekontrolovatelných reakčních potenciálů v důsledku zpomalených nebo začínajících průběhů reakce, jako např. nedostatečným promícháváním, nedostatečnou nebo příliš nízkou počáteční startovací teplotou jsou znemožněna opatření pro kontrolu a příp. vedení reakce. K tomu lze použít zařízení:

- a) pro kontrolu průběhu míchání,
- b) zařízení pro srovnání skutečné a požadované teploty,
- c) zařízení pro kontrolu potřebného chladícího nebo topného média,
- d) pro sestavení látkové bilance nebo bezpečnostního systému podle modelu procesu.

Provedou se opatření pro kontrolu tlaku a teploty, která spustí automaticky působící procesy, když další procesy, jako např. výpadek chlazení nebo vnesení nečistot, by vést k průběhům reakcí s překročením dovolených provozních parametrů.

Spustí se opatření vyvolávající nouzové odstavení a převedení do bezpečného stavu, např. systémy s nouzovým vypnutím nebo zastavením reakce.

Spustí se opatření pro převedení tlakového zařízení do bezpečného stavu, např. částečným odpojením, opravou chlazení anebo dalším zásobovacím systémem.

10) Nastane-li během provozu tlakového zařízení bezprostřední stav ohrožení, např. vlivem nepředvídatelného průběhu reakce, nebo nebezpečného působení zvenku, je třeba provést potřebná protipatření:

- jestliže vznikly na tlakových nádobách, kotlích, potrubích nebo jiných provozních zařízeních ohrožující netěsnosti, které nelze ihned odstranit, nebo vznikly jiné oblasti ohrožení vyvolané poruchami, pak je třeba, aby osoby neodkladně opustily tyto oblasti. Nebezpečnou oblast je třeba omezit, vyznačit a monitorovat,
- nebezpečné oblasti mohou být zpřístupněny jen tenkrát, když jsou tyto práce povoleny jen pro oprávněnou osobou a práce v nebezpečné oblasti jsou provedeny s potřebným bezpečnostním opatřením,
- potřebný souhrn opatření u předvídatelných provozních poruch je třeba stanovit v předstihu alespoň jedné hodiny.

Provozní bezpečnost ovlivňující časově závislá poškození

Provozní parametry existující během provozu v tlakovém zařízení jsou hlavními ovlivňujícími parametry pro průběh časově závislých poškození. Pro sledování a posouzení stavu poškození může to být proto žádoucí sledovat provozní parametry po dobu provozu.

U cyklicky zatížených složek zařízení jsou sledovány změny zatěžování (počet, amplitudy), aby se mohlo vytvořit srovnání mezi projekčními údaji a nahromaděnými provozními údaji.

Časově závislá poškození jsou vyvolána:

1. Vnitřní korozi působením korodující účinné látky (médiá), příp. ovlivněná teplotou a mechanickým zatížením.
2. Vnější korozi atmosférickou vlhkostí, kondenzátem, dlouhodobou / trvalou vlhkostí u izolace při ohřevu nebo chlazení.
3. Možnými mechanismy koroze:
4. bodová, lokální koroze u nelegovaných nebo nízkolegovaných ocelí,
5. eroze,
6. styková příp. selektivní koroze,
7. koroze ve spáře,
8. inter- / mezi-krytalická koroze,
9. důlková koroze,
10. napěťová trhlinová koroze,
11. vysokoteplotní koroze (např. nauhličení, nitridace, teplé taveniny).
12. Erozi:
13. vnitřní erozi při erozivních vlastnostech média, vysokých rychlostech proudění,
14. vnější erozi vyvolanou např. podílem popelovin v kouřových plynech.
15. Kavitaci vyvolanou tvorbou parních bublin a jejich rozpadem za armaturami nebo ve skříních čerpadel.
16. Časový poškozením v oblasti vysokých teplot v důsledku vznikem pórů, řetězcem pórů nebo drážek u vysokotlakých kotlů nebo potrubí s ostrou parou častým proměnným zatížením teplotou nebo tlakem.
17. Poškozením při kmitání (únavou) v důsledku častým měnícím se tlakovým / teplotním zatížením nebo cyklickým vnějším působením.
18. Křehnutím kovových materiálů v důsledku vyšších zatížení médií s obsahem vodíku, vylučováním zkřehlých fází, při počátečním zkřehnutí, při hlubokých teplotách
19. Stárnutím umělých hmot, např. UV-zářením, při superpozici různých mechanismů poškození vzniklých podle předchozích bodů.

Úniky médií při technicky těsném a při trvale technicky těsném spoji

1. Netěsnosti na uzávěrech a rozebíratelných spojiích se statickými těsnicími prvky:

- a) na poškozených těsnicích prvcích nebo těsnicích plochách, zejména u pohyblivých linek (hadice a potrubí s klouby), jestliže tím není již zaručen bezpečný spoj a tím technická těsnost,
- b) nevhodné těsnění vůči médiu nebo vnějším účinkům (např. možné napadení korozí na šroubech vlivem okolí),
- c) těsnění ovlivněné stárnutím nebo časově závislými změnami těsnění, např. sedáním, křehnutím,
- d) nedovolené zatížení těsnicích prvků, např. neúnosným materiálem nebo odchylkami určujícím způsobem provozu,
- e) chyby montáže, např. nejsou-li správně použity konstrukční prvky uzávěrů (např. chybným utahovacím momentem) nebo když byla použita nedovolená napětí chybnými body naražení, která vedou k deformacím,
- f) teplotní rázy, např. při plnění beztlakových nádrží zkapalněnými plyny nebo při nesprávném vstupu studených tekutin do částí zařízení, pokud nejsou těsnění, příp. části zařízení navrženy pro vzniklé hluboké teploty.

2. Úniky médií při otevření částí zařízení v důsledku:

- a) nerozpoznatelný přetlak na částech otevírání,
- b) dodatečná likvidace ucpání u již otevřených tlakových zařízení,
- c) příliš velké odebírané množství z míst odběru vzorků,
- d) nesprávná obsluha u armatur, které nejsou napojené na uzavřený systém,
- e) zdržovaný výstup zbytkových kapalin, např. sifonových účinkem nebo tvoření pytlů po nahromadění na nejnižších místech potrubí,
- f) spontánní odpar kapalin po snížení tlaku, např. přehřátím kapaliny.

3. Vývod z pojistných ventilů, pojistných membrán, tlakově odlehčených klapek, odvzdušňovacích a odlehčovacích potrubí s tím, že:

- a) nebezpečné koncentrace na pracovišti u látek a přípravků s charakteristickými vlastnostmi podle vyhlášky 402/2011 Sb.,
- b) překročení uznaných mezních hodnot do atmosféry, u látek a přípravků podle uvedené vyhlášky (např. hodnoty podle IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health), AEGL-2 (Acute Exposure Guideline Levels) nebo ERPG-2 (Emergency Response Planning Guidelines),
- c) tvorba výbušné atmosféry,
- d) přívod u látek bez charakteristických vlastností podle uvedené vyhlášky (např. vytlačení vzdušného kyslíku inertními plyny),

4. Výbuch / deflagrace ve spalovacím zařízení tlakových zařízení, v důsledku:

- a) nahromadění hořlavých plynných nebo prachových / vzdušných směsí v topeništích a kouřových spalinových tazích tlakových zařízení, které mohou vyvolat výbuch/deflagraci.

VLIV INOVACE VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ NA VLASTNOSTI ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ

INFLUENCE OF TECHNOLOGY INNOVATION ON CREEP PROPERTIES OF STEELS

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

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

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

Abstrakt

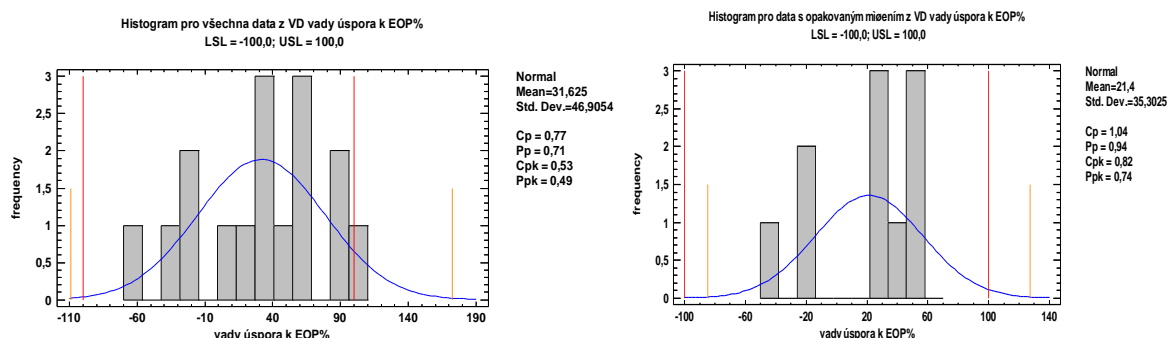
Ve spolupráci společností SVÚM a.s. a ŽĐAS, a.s. byl ověřován vliv zavedení moderní vakuové technologie při výrobě tekutého kovu. Mechanické, a především dlouhodobé creepové vlastnosti, byly porovnány u žárupevných CrMo a CrMoV ocelích, vyrobených dvěma různými technologiemi. Původní, ale stále používanou metodou je zpracování tekutého kovu pomocí elektrické obloukové pece (EOP). Druhou variantou je výroba pomocí moderní vakuové technologie (EOP/LF/VD). Pro mechanické zkoušky byly použity lité a tvářené varianty 3 různých ocelí.

Abstract

The influence of introducing modern vacuum technology in the production of liquid metal was verified in cooperation with SVÚM a.s. and ŽĐAS, a.s. The mechanical and especially the long-term creep properties were compared for CrMo and CrMoV steels, produced by two different technologies. An original but still used method is the processing of liquid metal using an electric arc furnace (EOP). The second variant is production using modern vacuum technology (EOP/LF/VD). Mechanical tests were performed on cast and forged variants of 3 different steels.

Úvod

Ve společnosti ŽĐAS, a.s. v posledních letech výrazně narůstá podíl výroby odlitků ze středně legovaných ocelí odlévaných z ocelí s metalurgickým zpracováním EOP/LF/VD. V rámci přechodu ze starší na novou technologii byl nejprve ověřován vliv sekundární metalurgie na objem vad odlitků. Data byla získána z 80 typů odlitků, které byly vyráběny jak pouze na EOP, tak na EOP/LF/VD.



Obr. 1: Histogramy všech reálně dosažených procentuálních změn objemů vad (vlevo) při výrobě oceli z EOP/LF/VD místo pouze EOP, a tatáž data u odlitků vyráběných s použitím EOP/LF/VD více jak 1x (vpravo) [1]

Ze zpracovaných dat, shrnutých na obr. 1 vyplývá, že u sledovaných odlitků bylo průměrně dosaženo snížení objemu vad odlitků o 21 % při využití sekundární metalurgie EOP/LF/VD. Z detailního rozboru vad odlitků bylo zjištěno, že klesá především podíl lineárních vad v odlitcích. [1]

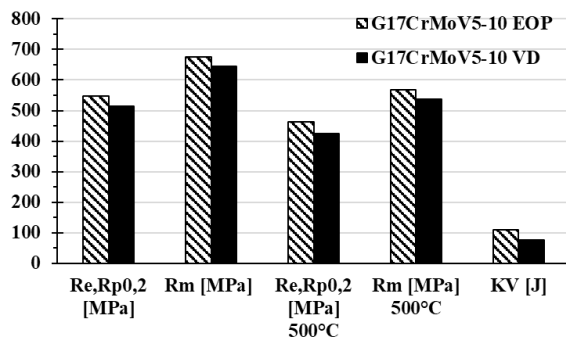
V rámci projektu TH03020028 byly porovnávány vlastnosti martenzitických ocelí, jejichž výroba je ve společnosti ŽDAS, a.s. velmi častá. U jednotlivých ocelí byly zkoušeny lité i tvářené varianty. Porovnávaly se krátkodobé mechanické vlastnosti a dlouhodobé creepové chování.

Pro zkoušky byly vybrány následující materiály:

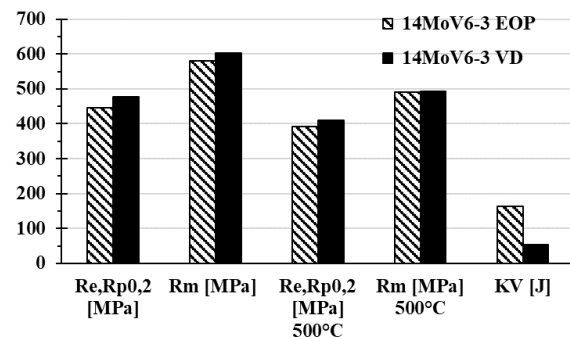
- G17CrMo9-10, 10CrMo9-10,
- G17CrMoV5-10, 14MoV6-3,
- GX23CrMoV12-1, X20CrMoV11-1.

Vliv sekundární metalurgie na mechanické vlastnosti

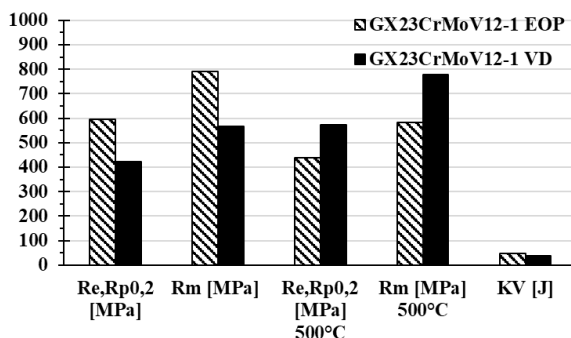
Pro porovnání krátkodobých mechanických vlastností byly vybrány materiály G17CrMoV5-10, 14MoV6-3, GX23CrMoV12-1 a X20CrMoV11-1. Na obr. 2 až obr. 5 jsou zobrazeny získané výsledky všech ocelí. Z výsledků je zřejmé že sekundární metalurgie má pozitivní vliv především na vlastnosti při vysokých teplotách u materiálů GX23CrMoV12-1 a X20CrMoV11-1. Při zkouškách za pokojové teploty vycházely u této ocele lepší hodnoty u materiálu zpracovaného technologií EOP. U materiálů G17CrMoV5-10, 14MoV6-3 jsou mechanické vlastnosti podobné u obou použitých výrobních technologií.



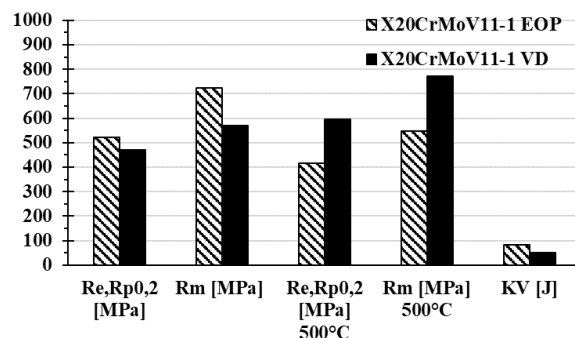
Obr. 2: Porovnání mechanických vlastností G17CrMoV5-10



Obr. 3: Porovnání mechanických vlastností 14MoV6-3



Obr. 4: Porovnání mechanických vlastností GX23CrMoV12-1



Obr. 5: Porovnání mechanických vlastností X20CrMoV11-1

Creepové vlastnosti

Žárupevnost byla zkoušena u všech výše zmíněných ocelí. Zkoušky probíhaly při třech různých teplotách a podmínky zkoušek byly voleny tak, aby zkoušky trvaly od 100 do cca 10 000 hodin. Výsledky byly zpracovány Seifertovým modelem [1] s Larson–Milerovým parametrem, který lze zapsat ve tvaru:

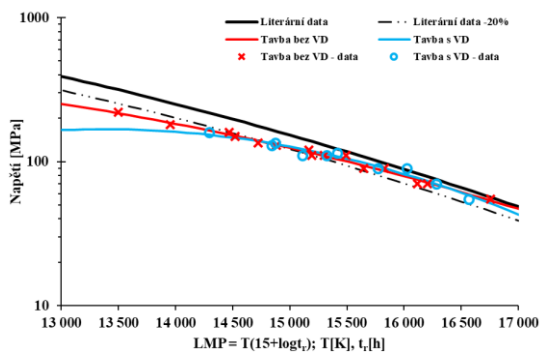
$$\log \sigma = A_1 + A_2 \cdot P_{LM} + A_3 \cdot P_{LM}^2, \quad (1)$$

kde $P_{LM} = T \cdot (\log t_r + A_4)$, σ je napětí [MPa], T je teplota [K], t_r je doba do lomu [h], A_1 až A_4 jsou materiálové konstanty.

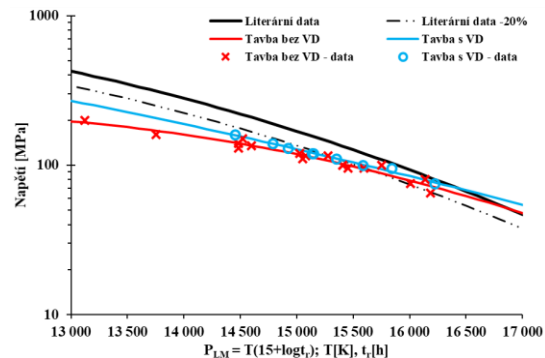
Získané výsledky byly u jednotlivých ocelí porovnány mezi tavbou vyrobenou technologií s VD a tavbou bez VD. Zároveň byly výsledky srovnány s hodnotami, které pro danou ocel stanovuje norma. [3, 4] Porovnání jednotlivých materiálů je uvedeno na obr. 6 až obr. 11.

Z výsledků je patrné následující:

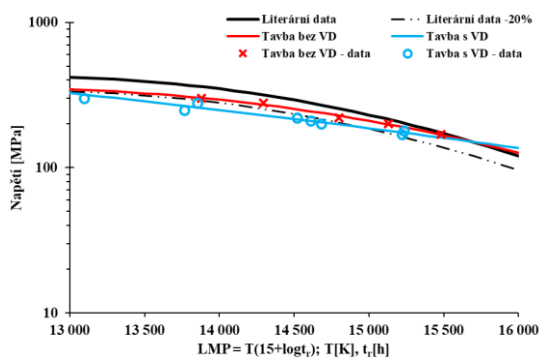
- G17CrMo9-10, 10CrMo9-10 – u těchto ocelí proběhl největší počet creepových experimentů, výsledky jsou srovnatelné u obou technologií,
- G17CrMoV5-10, 14MoV6-3 – u lité varianty byly dosaženy lepší výsledky u tavby bez zpracování technologií EOP-LF-VD, u tvářené varianty zatím vykazuje mírně lepší vlastnosti materiál zpracovaný technologií EOP-LF-VD,
- GX23CrMoV12-1, X20CrMoV11-1 – u lité varianty zatím nebyl proveden dostatečný počet zkoušek, dosavadní výsledky však ukazují na to, že vlastnosti budou u obou typů ocelí srovnatelné, u tvářené varianty se jako lepší jeví tavba zpracovaná technologií EOP-LF-VD.



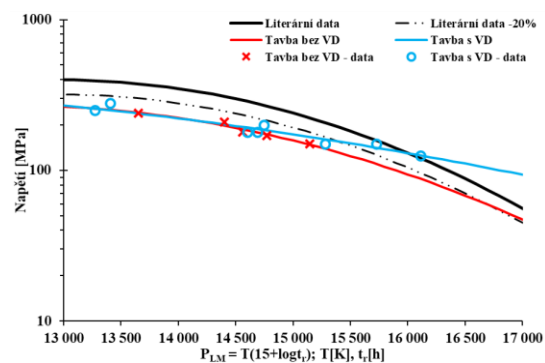
Obr. 6: Porovnání creepových vlastností G17CrMo9-10 [3]



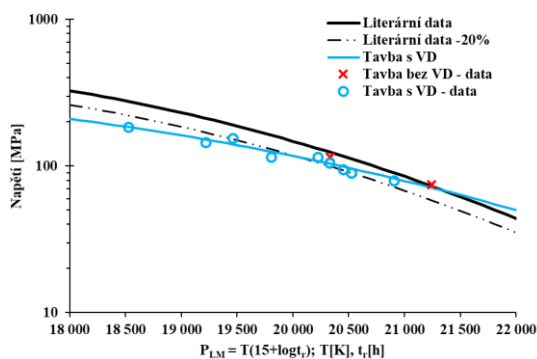
Obr. 7: Porovnání creepových vlastností 10CrMo9-10 [4]



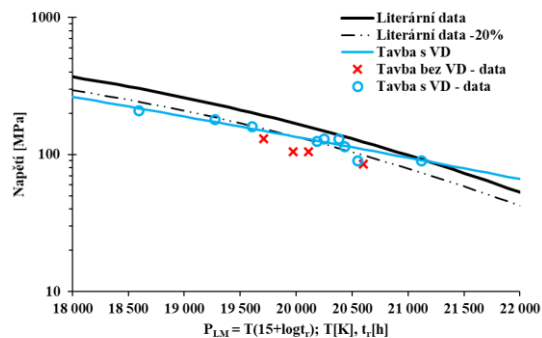
Obr. 8: Porovnání creepových vlastností G17CrMoV5-10 [3]



Obr. 9: Porovnání creepových vlastností 14MoV6-3 [4]



Obr. 10: Porovnání creepových vlastností GX23CrMoV12-1 [3]



Obr. 11: Porovnání creepových vlastností X20CrMoV11-1 [4]

Závěr

Předložený příspěvek shrnuje vliv sekundární metalurgie na vlastnosti vybraných martenzitických ocelí.

V předchozí studii [1] se prokázalo dosažení vyšších plastických vlastností a snížení objemu lineárních vad v odlitcích při použití technologického procesu zahrnující EOP/LF/VD namísto postupu jen s EOP.

Vliv sekundární metalurgie na mechanické vlastnosti se výrazněji projevil u martenzitických ocelí GX23CrMoV12-1 a X20CrMoV11-1 při zkouškách za vysokých teplot. Při ostatních zkouškách byly výsledky u ocelí, zpracovaných technologií EOP/LF/VD stejné nebo o něco nižší než u technologie EOP.

Materiály vyrobené oběma technologiemi dosáhly srovnatelných creepových vlastností. Creepová odolnost některých ocelí vyrobených postupem EOP/LF/VD byla dokonce mírně vyšší.

Výsledky mechanických a creepových zkoušek byly získány v rámci projektu TAČR TH03020028 s názvem „Výzkum a vývoj vlivu moderních vakuovacích metalurgických postupů výroby tekutého kovu na vlastnosti žárupevných ocelí“.

Literatura

- [1] Čech, J. (2014): Vliv sekundární metalurgie na kvalitu ocelových odlitků. *XXI. celostátní konference Výroba a vlastnosti oceli na odlitky s kuličkovým grafitem*, Česká slévárenská společnost, str. 41-49. ISBN 978-80-02-02562-7
- [2] Seifert, W., Melzer, B. (1992): *Rechnerische Auswertung von Zeitstandversuchen am Beispiel des Stahles 13CrMo4-4.15. Vortragveranstaltung „Langezeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“*, Düsseldorf.
- [3] ČNI (2017): *ČSN EN 10213+A1, Ocelové odlitky pro tlakové účely*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.
- [4] ČNI (2018): *ČSN EN 10222-2, Ocelové výkovky pro tlakové účely – část 2: Feritické a martenzitické oceli pro použití při vyšších teplotách*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.

ZBYTKOVÁ NAPJATOST POVRCHOVÝCH VRSTEV OCELI OPRACOVANÉ METODOU SPONGE-JET

SURFACE RESIDUAL STRESSES OF SPONGE-JET TREATED STEEL

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

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

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Príspevek prezentuje výsledky rentgenografického difrakčného výzkumu reálné struktury povrchových vrstev vzorků opracovaných metodou Sponge-Jet archivního materiálu tlakové nádoby jaderného reaktoru. Analýzy byly provedeny v rámci širšího výzkumu zabývajícího se těžkými haváriemi jaderného reaktoru VVER 1000 s cílem zabránit protavení roztavené aktivní zóny ven z tlakové nádoby. Byl stanoven hloubkový průběh makroskopických zbytkových napětí, povrchové fázové složení a parametry reálné struktury. V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí, naopak referenční broušený vzorek vykazoval zbytková napětí tahová. Obecně lze říci, že tlaková zbytková napětí zlepšují mechanické vlastnosti a zvyšují únavou životnost.

Abstract

The paper presents the results of X-ray diffraction research of the real structure of the samples' surface processed by the Sponge-Jet method of the archive material of the nuclear reactor pressure vessel. The analyses were performed as part of a broader study concerning severe accidents at the VVER 1000 nuclear reactor in order to prevent the molten core from melting out of the pressure vessel. The gradients of macroscopic residual stresses, surface phase composition and parameters of the real structure were determined. Significant compressive residual stresses were found in the subsurface layers of the samples treated by the Sponge-Jet method, whereas the reference ground sample showed tensile residual stresses. In general, compressive stresses improve mechanical properties and increase fatigue life.

Úvod

Jakmile se kvůli havárii přeruší průtok chladicí vody reaktorem, prudce vzroste teplota palivových článků. Na dně tlakové nádoby se vytvoří tavenina podobná lávě, v níž dál probíhá štěpná reakce. U reaktoru VVER 1000 v první sekundě po havárii vzniká tepelný výkon 240 MW. Jak reakce vyhasíná, tepelný výkon klesá na 30 MW po první hodině od havárie. Pokud se toto teplo zvnějšku reaktoru neodvede, tavenina se rychle protaví skrz tlakovou nádobu a během pár hodin pronikne i několikametrovými betonovými základy. Do prostoru mezi nádobou a okolní betonovou šachtou je zapotřebí pustit chladicí vodu, která odvede vzniklé teplo a udrží tlakovou nádobu neporušenou. Žádoucí je dosáhnout takzvaného bublinkového varu, kdy vznikající pára odchází vzhůru v bublinách a k povrchu reaktoru se dostává nová voda. Nejhorší situace by nastala, kdyby se mezi povrchem a chladicí vodou vytvořila vrstva páry, která by bránila průniku vody k povrchu a dalšímu chlazení [1].

Pro povrchovou úpravu nádoby reaktoru, která by modifikovala povrch z výše zmíněného důvodu, byla zvolena metoda Sponge-Jet, která zvyšuje účinnost a produktivitu při provádění tryskacích prací. Tato technologie je šetrná k životnímu prostředí, jelikož nepoužívá oxid křemičitý, vykazuje nízké emise prachu i hluku. Metoda využívá kompozitní brusiva, která spojují abrazivní částice s polyuretanovou pěnou.

Při přenosu kinetické energie dopadajících částic abraziva do tryskaného materiálu dochází k plastické deformaci povrchových vrstev opracovávaného materiálu. Při předání dostatečné kinetické energie dochází ke změně mikrostruktury a ke generaci tlakových zbytkových napětí [2]. V podpovrchových vrstvách vzniká gradient jak strukturních parametrů, tak zbytkových napětí, které mohou významně ovlivnit mechanické vlastnosti, únavovou životnost i korozi-vzdornost.

Zbytková napětí jsou napětí, která existují v tuhém tělese, aniž by na něj působili další vnější síly. Rozlišujeme tzv. makroskopická napětí, která jsou ve velkých oblastech homogenní. Dosahují rovnováhy v celém objemu tělesa. Přítomnost makroskopických zbytkových napětí lze pozorovat změnou tvaru materiálu po narušení napěťové rovnováhy vnějším zásahem. Naopak mikroskopická napětí (popř. mikrodeformace) jsou homogenní v objemech o velikosti jednotlivých krystalitů, kde se vzrůstající přítomností poruch mřížky roste mikrodeformace, a tedy i zpevnění. Krystalit (neboli oblast koherentního rozptylu rentgenového záření) v difrakčním smyslu rozumíme monokrystalek, který nemá svou vlastní mozaikovou strukturu. Zrno z hlediska metalografického může zahrnovat naproti tomu obecně i agregát většího počtu různě orientovaných monokrystalků. Parametry reálné struktury jsou výše zmíněné mikrodeformace a velikost krystalitů [3]. Zpevněný povrch a tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozi-vzdornost. Zlepšuje se vrubová houževnatost, odolnost proti únavě, opotřebení, naopak se snižuje rychlost šíření trhlin, nebezpečí korozi-vzdorného praskání, náchylnost k mezikrystalové korozi apod. Tyto závěry jsou velmi důležité pro hodnocení integrity tlakových nádob reaktoru.

Experiment

Pro opracování povrchu archivního materiálu tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 byla vybrána dvě abrazivní média od firmy Sponge-Jet – Silver 30 a Silver 80. První využívá jako abraziva oxid hlinitý (korund) zrnitosti 30, druhá zrnitosti 80.

Analýzy byly provedeny na referenčním broušeném vzorku (označeném jako BR) a dvou vzorcích po prvotním broušení opracovaných metodou Sponge-Jet (označených jako SJ30 a SJ80). Zbytková napětí byla analyzována ve dvou navzájem kolmých směrech označených jako L a T.

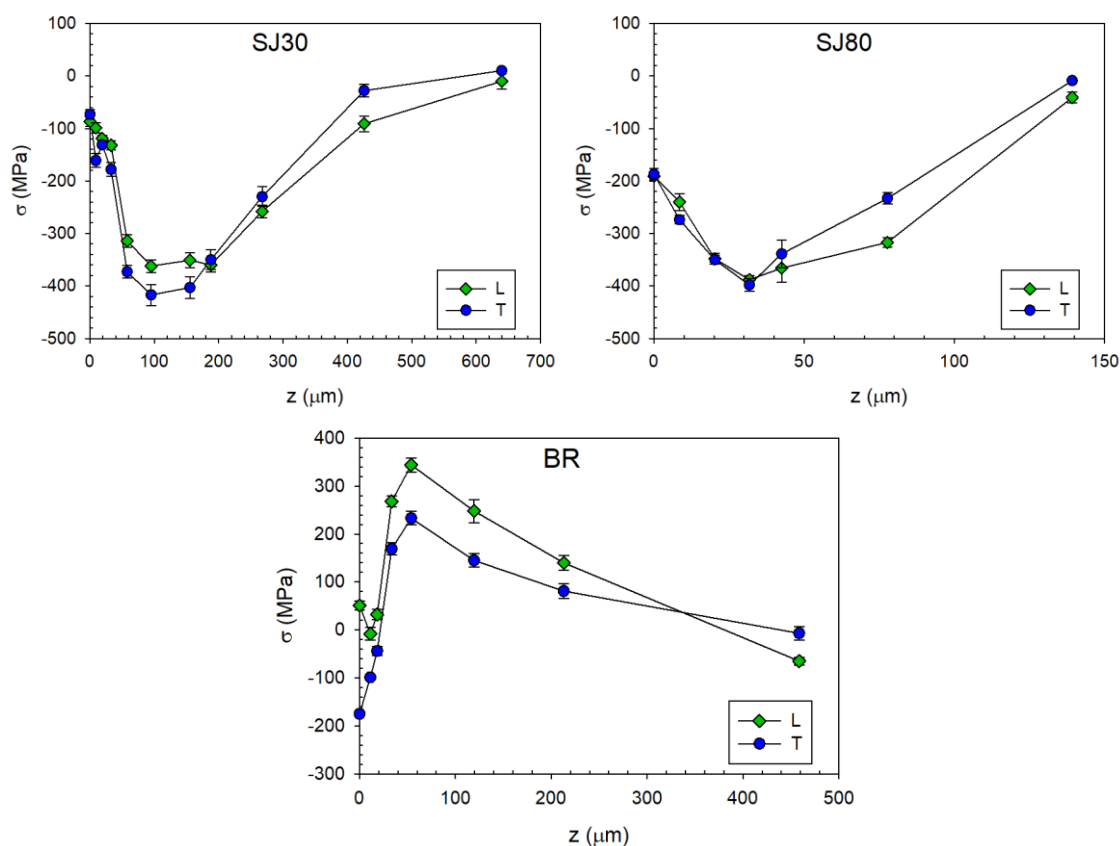
Difrakční měření pro určení makroskopických zbytkových napětí bylo prováděno na θ - θ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical s rentgenkou s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie $\{211\}$ fáze α -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel $2\theta^{211}$ byl určen pomocí profilové funkce Pearson VII a Rachiingerovy metody na separaci difrakčních maxim $CrK\alpha_1$. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [3]. Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami $2 \times 0,5 \text{ mm}^2$, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenografického záření do zkoumaného materiálu ca 3–5,5 μm .

Pro určení fázového složení povrchových vrstev, byly získány difrakční obrazce v klasické Braggově-Brentanově konfiguraci s kobaltovým zářením. Naměřené difrakční diagramy byly zpracovány programem X'Pert HighScore Plus a krystalické fáze byly identifikovány pomocí databáze PDF-2. Kvantitativní analýza byla vyhodnocena pomocí Rietveldovy analýzy v softwaru MStruct. Efektivní hloubka vnikání byla v tom případě 2–10 μm .

Pro stanovení hloubkových průběhů makroskopických zbytkových napětí bylo zvoleno bezsilové odebrání povrchových vrstev materiálu pomocí elektrolytického leštění realizovaného na zařízení PROTO Electrolytic Polisher s elektrolytem A2. Odlešťovaná oblast byla definována pomocí krycí masky o \varnothing 15 mm. Tloušťka odebrané vrstvy byla určena pomocí digitálního mikrometrického úchylkoměru a statisticky určena z devíti měření.

Výsledky a diskuze

Hloubkové průběhy makroskopických zbytkových napětí vzorků BR, SJ30 a SJ80 jsou uvedeny na následujících obrázcích, viz obr. 1. V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí, naopak kontrolní broušený vzorek vykazuje tahová zbytková napětí. Oba analyzované směry vykazují pro všechny vzorky podobné průběhy. Tloušťka napětově ovlivněné povrchové vrstvy je u vzorku SJ30 cca 450 μm a největších tlakových napětí (cca -400 MPa) bylo dosaženo v hloubce 100-200 μm . Pro vzorek SJ80 je ovlivněná hloubka cca 140 μm a maximum tlakových zbytkových napětí bylo dosaženo v hloubce 40 μm . Maxima tahových napětí kontrolního broušeného vzorku BR bylo dosaženo v hloubce cca 50 μm . Je patrné, že povrchovou úpravou metodou Sponge-Jet došlo k úplnému potlačení efektu broušení.



Obr. 1: Hloubkové průběhy makroskopických zbytkových napětí na vzorcích SJ30, SJ80 a BR, kde z je hloubka od povrchu

Pomocí kvalitativní fázové analýzy byly na povrchu vzorků nalezeny pouze dvě fáze – ferit a Al_2O_3 , viz tab. 1. Parametry reálné struktury feritické fáze získané pomocí Rietveldovy analýzy jsou také uvedeny v tab. 1. Z výsledků je patrné, že na povrchu broušeného vzorku byla fázovou analýzou určena pouze feritická fáze. U vzorků SJ byl nalezen i korund (Al_2O_3), jeho zastoupení je u obou vzorků SJ v rámci chyby stejné. Korund se dostal do povrchové vrstvy z abrazivního média. Díky plastické deformaci povrchu došlo tryskáním k mírnému poklesu

velikostí krystalitů. Naopak hodnota mikrodeformace dosahuje několikanásobně vyšších hodnot pro vzorky SJ, kdy tyto oba vzorky vykazují podobné hodnoty. Vyšší mikrodeformace je způsobena dopadajícími abrazivními částicemi, které zvýšily hustotu poruch krystalové mřížky.

Tab. 1: Hmotnostní zastoupení jednotlivých krystalických fází v povrchové vrstvě a parametry reálné struktury (velikost krystalitů D, mikrodeformace e) feritické fáze v povrchové vrstvě

Vzorek	Ferit [hm. %]	Al ₂ O ₃ [hm. %]	D [nm]	e [10 ⁻⁴]
BR	100	0	49,6±0,7	5,7±0,6
SJ30	86,3±0,2	13,7±2,7	45,8±0,7	20,6±0,3
SJ80	85,7±0,1	14,3±2,3	42,4±0,5	19,8±0,2

Závěr

V podpovrchových vrstvách vzorků opracovaných pomocí metody Sponge-Jet byla zjištěna významná tlaková zbytková napětí. Naopak broušený vzorek vykazuje nežádoucí tahová napětí.

Tloušťka napěťově ovlivněné povrchové vrstvy je u vzorku SJ30 ca 450 μm a největších tlakových napětí bylo dosaženo v hloubce 100–200 μm. Pro vzorek SJ80 je ovlivněná hloubka ca 3× menší. Lze tedy konstatovat, že parametry opracování povrchu metodou Sponge-Jet výrazně ovlivňují podpovrchový stav zbytkové napjatosti.

Fázovou analýzou bylo zjištěno, že povrchová vrstva vzorků SJ obsahuje zbytky abrazivního korundu a vykazuje vyšší hodnotu mikrodeformace, která popisuje hustotu defektů – dochází tedy k většímu deformačnímu zpevnění.

Trend zbytkových napětí u vzorků SJ je podobný jako u deformačně zpevněných povrchů (např. kuličkování, válečkování apod.). Takto zpevněný povrch a tlaková zbytková napětí v podpovrchové vrstvě zvyšují mechanické, ale i korozní vlastnosti.

Poděkování

Autoři děkují projektu TITSSUJB 830 „Zvýšení bezpečnostní rezervy aplikací IVMR pro VVER 1000“. Práce byla podpořena projektem CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778 „Centrum pokročilých aplikovaných přírodních věd“ v rámci Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání pod dohledem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS19/190/OHK4/3T/14.

Literatura

- [1] Stuchlík, J. (2018): *Vědci simulují v Řeži jadernou havárii*. E15.cz. Dostupné na: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/vedci-simuluji-v-rezi-jadernou-havarii-1343925#>
- [2] El-Hofy, H. A. G. (2005): *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. McGraw Hill. ISBN 0-07-145334-2
- [3] Kraus, I., Ganev, N. (2004): *Technické aplikace difrakční analýzy*. Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-03099-7

VLIV EROZNÍHO POŠKOZENÍ NA ŽIVOTNOST NÍZKOTLAKÝCH LOPATEK S POUŽITÍM RŮZNÝCH EROZNÍCH OCHRAN

INFLUENCE OF EROSION DAMAGE ON THE LIFE-TIME OF LOW PRESSURE BLADES USING VARIOUS EROSION PROTECTION

Jakub Vlasák ^{a)*} a Zdeněk Ruml ^{b)*}

a) Doosan Škoda Power s.r.o.

b) Doosan Škoda Power s.r.o. (retired)

** The views and opinions expressed in the article are those of the individual presenter and should not be attributed to Doosan Škoda Power s.r.o. Doosan Škoda Power gives no warranty and accepts no responsibility or liability for the accuracy or the completeness of the information and materials contained in this article.*

Abstrakt

V současné době čelíme změně produkce typu parních turbín, kdy v minulosti byly produkovány zejména bloky vysokých výkonů 200 – 500 MW (uhelné) případně 600 – 1200 MW (jaderné). Období posledních 5 let ukázalo směr produkce bloků spíše nižších výkonů 20 – 100 MW. V drtivé většině případů se jedná o spalovny odpadů nebo biomasy, kdy hlavním parametrem je nižší teplota admisní páry než v případě uhelných/jaderných jednotek a požadavek na proměnlivý způsob provozování, zejména při nízkém provozním zatížení. To spolu s vysokou vlhkostí v posledním stupni výrazně zvyšuje intenzitu erozního působení na oběžné lopatky a tím snížení jejich životnosti.

Abstract

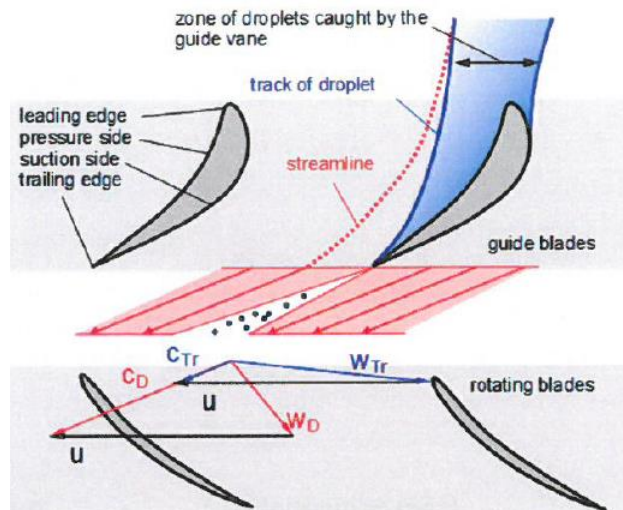
We are presently facing a change in the production of the turbine type, when in the past the products were mainly high power units 200 – 500 MW (coal) or 600 – 1200 MW (nuclear). The period of the last 5 years showed the direction of production of units of rather lower outputs 20 – 100 MW. In the majority of cases, these are Waste to Energy or Biomass, where the main parameter is a lower temperature of admission steam than in the case of coal / nuclear units and the requirement for a variable mode of operation, especially at low operating loads. This, together with the high humidity in the last stage, increases the intensity of blade erosion and thus reduces their service life.

Eroze vodními kapkami

Představuje významný problém z pohledu životnosti pro koncové oběžné nízkotlakého stupně pracující v prostředí mokré páry, kdy při velmi frekventovaném dopadu vodních kapek dochází erozi náběžné hrany tedy úbytku materiálu lopatky špičkového profilu případně vazebních členů. Úbytek materiálu vztažený k délce tělivity daného profilu může představovat až desítky % pro velmi erozně náročné provozní parametry parní turbíny.

Obecně rozlišujeme dva typy kapek d_k – průměr obr. 1:

- Jemné ($d_k < 5 \mu\text{m}$) kapky vznikají kondenzací v oblasti Wilsonovy linie. Dopad těchto kapek na oběžné lopatky nezpůsobuje erozní poškození. Množství těchto kapek ulpívá na rozváděcích lopatkách, kde se poté slévají a vytvářejí tzv. vodní filmy, které jsou následně strhávány proudem páry.
- Hrubé ($d_k = 5 - 500 \mu\text{m}$) kapky vznikají rozdrobením vodních filmů na odtokové hraně rozváděcí lopatky. Takto rozdrobené kapky jsou poté urychlovány a unášeny proudem páry k oběžným lopatkám, kde dochází k jejich dopadu na OL, tedy k erozi vodními kapkami. Čím větší je průměr kapky, tím méně je taková kapka urychlena. Tento stav se projevuje v dopadové rychlosti, která je mnohem větší než u kapek menších průměrů.



Obr. 1: Schématické znázornění formování a pohybu vodních kapek C_D , C_{Tr} = absolutní rychlost páry / kapek W_D , W_{Tr} = relativní rychlost páry / kapek, u = obvodová rychlost oběžných lopatek [1]

Intenzita erozního poškození závisí na mnoha faktorech, kde nejvýznamnější jsou:

- dopadová rychlost kapek,
- velikost kapek,
- vlhkost => množství kapek.

Erozní působení mokré páry je možné popsat na základě představy rychlostních trojúhelníků páry a kapiček vody – viz obr. 1. Směr relativní rychlosti kapek hrubé fáze W_{Tr} je jiný než směr relativní rychlosti páry W_D . Kapky hrubé fáze vlivem menšího urychlení na rychlost C_{Tr} dopadají na oběžnou lopatku pod jiným úhlem s větší dopadovou rychlostí W_{Tr} a způsobují erozní poškození.

Dopady kapek způsobují krátkodobé (řádu μs [7]) vysoké kontaktní tlaky často převyšující meze únavy materiálu lopatek [5]. To má za následek vznik a šíření trhlin, jejich spojování s následným úbytkem materiálu. Největší úbytky jsou v oblasti náběžné hrany – viz obr. 2, které způsobují úbytky velikosti tětv a tím čerpání konstrukční životnosti lopatky. Při velkém úbytku tětvy (až 20 % délky) může dojít k předčasnému vyčerpání životnosti či následné destrukci lopatky, proto je potřeba použití erozních ochran, které mohou výrazně zpomalit erozní poškození, a tak zajistit splnění návrhové životnosti lopatky.



Obr. 2: Příklad erodovaných oběžných lopatek vlivem extrémního zatížení na konci životnosti – servis Doosan Škoda Power s.r.o. (DSPW)

Erozní ochrany (EO)

EO dělíme na dvě skupiny:

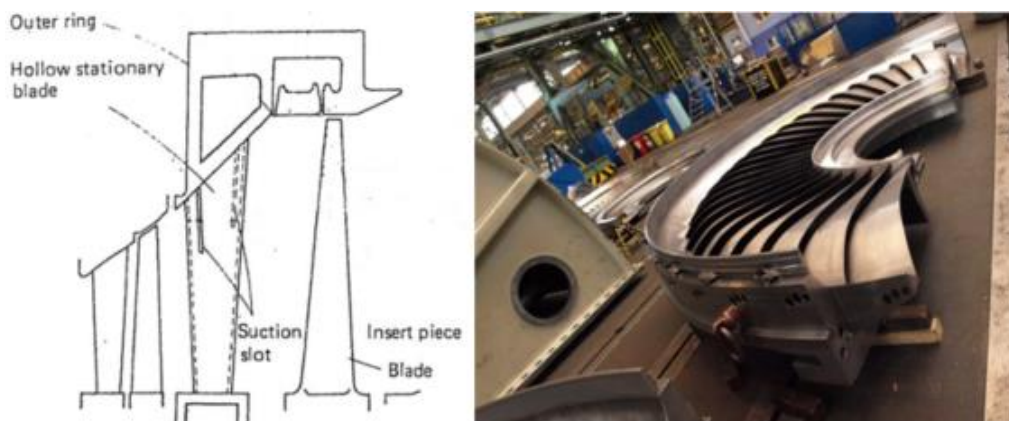
- Aktivní ochrana předchází eroznímu působení tím, že ovlivňuje tvorbu vodních filmů a parametrů hrubé fáze anebo dochází k separaci kapalně fáze před jejím vstupem do oběžných lopatek.
- Pasivní ochrana zmírňuje erozní působení tím, že v místě eroze použijeme jiného nebo upraveného materiálu. Zejména se jedná o povrchové úpravy materiálu.

Hlavním cílem EO je snížení případně zabránění vzniku erozního poškození na oběžných lopatkách (OL) a tím zvýšení jejich životnosti. Z dlouholetého výzkumu a zkušeností se jeví nejlepší kombinace aktivních a pasivních erozních ochran.

Aktivní ochrany a jejich vliv na erozi

V DSPW jsou zavedeny zejména následující čtyři typy aktivních ochran.

1. Odvodňovací kanály a separátory, které odvádějí vlhkost. Výsledkem je nižší vlhkost v posledním stupni a tím i nižší celkové množství kapalně fáze, které může dopadat na OL.
2. Konstrukční úprava axiální vzdálenost mezi rozváděcí a oběžnou lopatkou – čím větší je vzdálenost, tím je menší dopadová rychlost kapek, protože mají více času na urychlení [4]. Z důvodu minimálního zásahu do konstrukčního řešení turbíny je dostačující naklonění rozváděcích lopatek.
3. Duté odsávané lopatky se řadí mezi velmi úspěšné a často používané aktivní erozní ochrany. Vodní film vzniklý na rozváděcí lopatce je odsáván otvory, které jsou vyfrézovány na přetlakové a podtlakové straně rozváděcí lopatky – obr. 3. Při správném návrhu a spojení v kombinaci s odvodňovacím kanálem je možné snížit erozní působení až o 80 % [2]. Tato ochrana je velmi účinná a využívaná. Nevýhodou je vyšší cena finální lopatky. Další velmi významnou nevýhodou je nízká nebo žádná účinnost této ochrany v případě provozování v oblasti ventilace.



Obr. 3: Příklad rozváděcích lopatek opatřených drážkami pro odsávání vodních filmů [2]

4. Hydrofobní povlak, jenž je novinkou v oblasti erozního výzkumu DSPW využívá myšlenky ovlivnění formování vodního filmu na rozváděcí lopatce. Vysoký kontaktní úhel (mezi kapkou a povlakem) hydrofobního povlaku zajistí, že kapky jsou neprodleně unášeny proudem páry na odtokovou hranu, kde jsou rozdrobeny na menší kapky než v případě bez povlaku. Tyto závěry jsou potvrzeny měřením distribuce vodních kapek rozpadem vodních filmů na experimentálním tunelu na ČVUT [8]. Měření prokázalo výrazné snížení množství velkých kapek. Použitím této ochrany je možné dosáhnout významného snížení eroze. Tato ochrana je v DSPW používána zejména pro turbíny spalující odpad tedy typy velmi erozně náročné, v kombinaci s dalšími erozními ochranami – viz obr. 4.



Obr. 4: Rozváděcí lopatky opatřeny hydrofobním povlakem – DSPW

Pasivní ochrany a jejich vliv na erozi

V DSPW jsou zavedeny zejména následující tři typy pasivních ochran.

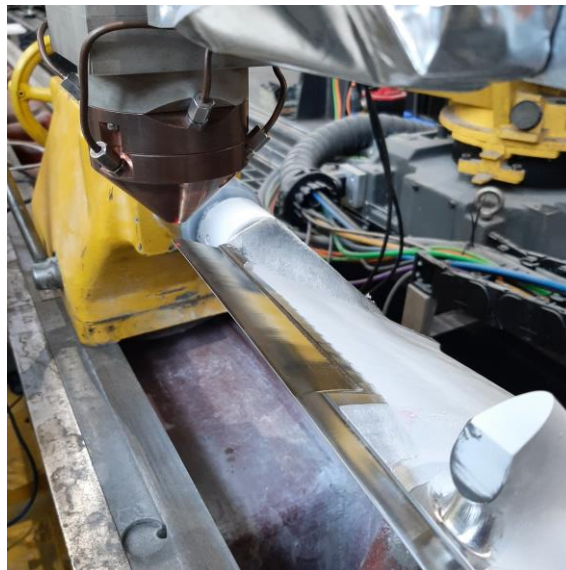
1. Celosvětově velmi známé a užívané je kalení náběžné hrany lopatky. Tvrdá martenzitická struktura vykazuje vyšší erozní odolnost. Historicky kalení prošlo kus cesty od kalení pomocí plamene přes indukci až k laseru. Tento postupný vývoj přinášel řešení zejména pro snížení vzniku deformací listu lopatky a lepší kontrolu procesu kalení a v druhé řadě neméně důležité zvýšení produkce. V případě volných lopatek problém deformací nebyl významný, ale s příchodem lopatek vázaných tzv. bandáží na špičce lopatky již bylo zapotřebí deformace omezit kvůli dodržení návrhových vlastností vazby. Hlavní nevýhoda kalení je její omezení z pohledu materiálu, který musí být kalitelný. Zde narážíme na omezení pro materiály T671 (vysokopevnostní vysoce legovaná martenzitická precipitačně vytvrditelná ocel) a Ti Grade 5 (Ti6Al4V).
2. PVD tenké vrstvy (obr. 5) řeší ochranu nekalitelných materiálů. Jedná se o fyzikální depozici velmi tenkých a tvrdých vrstev na povrch lopatky. Tloušťka vrstvy se pohybuje řádech mikrometrů. Výhodou této ochrany je, taktéž ochrana odtokové hrany oběžné lopatky, kde dochází k eroznímu poškození vlivem ventilačních provozů. Za posledním stupněm vznikne vír, který vrací velké množství velkých kapek zpět a dochází tak k erozi odtokové hrany. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, které oproti kalení může být až 10x. Při volbě této ochrany je potřeba zvážit technologické a ekonomické záležitosti. Výsledek vývoje PVD vrstvami nabízí vysoce účinnou erozní ochranu.



Obr. 5: Ukázka oběžných lopatek s PVD ochranou pro spalovnu odpadu – DSPW

3. V současnosti nejvíce progresivní a efektivní metodou pasivní ochrany je v DSPW stellitový (slitina kobaltu) návar viz obr 6. Laserovým paprskem je vystaven pás návaru

stellitu na náběžné hraně ve formě jednotlivých housenek. Vysoká erozní odolnost je dána tvrdými karbidy chromu rozmístěné v měkké kobaltové matici. Historicky tato ochrana byla již použita ve formě naletovaných plátků, u které je však nebezpečí odtržení plátků. Z pohledu eroze je stellite výrazně odolnější než základní materiál. Odolnost může být až 8x vyšší. Samotné navaření je velmi náročný proces jak z pohledu vzniklých deformací, které je potřeba udržet v požadované toleranci vůči listu, tak z pohledu vzniku neprůvaru či necelistvosti, které mohou iniciovat trhlinu. Velkou částí vývoje byly a jsou zkoušky únavy, které ukázaly snížení meze únavy návaru vůči základního materiálu s tím, že na základě těchto zkoušek byla nastavena technologie a proces navařování tak, aby únavové vlastnosti návaru minimalizovaly dopad do návrhových požadavků na lopatku.



Obr. 6: Příklad pracoviště navařování oběžných lopatek – kooperace DSPW

Proces návrhu a volby erozní ochrany

Volba typu erozní ochrany je čistě individuální. Každý projekt je hodnocen zvlášť. Pro stanovení vhodné erozní ochrany, která zajistí splnění návrhové životnosti nebo splnění extra garancí požadovaných zákazníkem, je zapotřebí několik důležitých informací [4]:

- způsob provozování,
- časové zastoupení jednotlivých provozů,
- požadované garance,
- požadovaná životnost lopatky.

V případě znalosti výše zmíněných bodů se může přejít k samotnému hodnocení. DSPW disponuje erozním modelem ŠKODAR, který byl vytvořen a implementován na základě výsledků unikátního erozního stendu [3], který dokáže simulovat zrychleně erozní poškození. Existence erozního modelu umožňuje hodnocení jednotlivých projektů a na základě výsledků je možné navrhnout vhodnou erozní ochranu. DSPW úspěšně implementovala erozní model do tzv. erozních map, které výrazně zjednodušily a urychlily erozní hodnocení. Zadáním provozních dat (c2ax – axiální rychlost páry, p2 - protitlak, x2 - suchost) je možné určit erozní úbytek pro danou lopatku pro daný čas. Tento způsob hodnocení se využívá pro návrh erozní ochrany u nových projektu nebo zpětné hodnocení eroze, kde pomocí provozních dat je možné vyhodnotit, jaké provozní podmínky způsobily výrazné erozní úbytky. Dále velmi slibným přístupem použití erozního modelu je online monitoring tzv. RMS (remote monitoring system) daných lopatek. Provozní data turbíny jsou analyzována v reálném čase pomocí nově vyvinuté aplikace, a kdy

je monitorováno aktuální erozní poškození lopatek Erozní úbytky bude možné sledovat v reálném čase. Hlavním cílem Nového přístupu je online monitorovat erozní poškození a přispět tak k zefektivnění a plánování údržby turbíny.

Závěr

Změna trhu a větší rozsah výroby zejména turbín nižších výkonů v rámci provozů spalujících odpad spolu se zvyšujícím se nárůstem požadavků zákazníka na způsob provozování turbíny, má významný dopad do životnosti oběžných lopatek z pohledu erozního úbytku tělivy než je tomu v případě větších turbín uhelných nebo jaderných bloků provozovaných v nominálním výkonovém režimu. Potřeba zachování či zvýšení životnosti takto exponovaných lopatek vedla k vývoji nových typů erozních ochran, které vylepšují, doplňují nebo zcela nahrazují ty původní. Zde stojí za zmínku např. elektrojiskrové navařování, které bylo zcela nahrazeno kalením. V současné době DSPW je schopna nabídnout komplexní řešení erozní ochrany, které zajistí požadovanou životnost LSB i pro velmi erozně náročné způsoby provozování. V řešení může být využita zejména aplikace kalení, stelitového návaru nebo PVD povlaku na oběžné lopatky v kombinaci s dutou rozváděcí lopatkou opatřenou hydrofobním povlakem.

Literatura

- [1] Schuerhoff, J., Ghicov, A., Sattler, K. (2015): *Advanced Water Droplet Erosion Protection for Modern Low Pressure Steam Turbine Steel Blades*. Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines, American Society of Mechanical Engineers, [online]. ISBN 978-0-7918-5679-6, available at: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2015/56796/Montreal,%20Quebec,%20Canada/238305>
- [2] Tanuma, T., Sakamoto, T. (1991): The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots. *IMEchE Conference on Turbomachinery: Latest Developments in a Changing Scene*, London (UK), pp. 179-189.
- [3] Ruml, Z., Straka, F. (1995): *A new model for steam turbine blade materials erosion*. *Wear*, Vol. 186-187, pp. 421-424. ISSN 0043-1648
- [4] Krzyzanowski, J. (1991): *Steam Turbine Blade Erosion*. Wydawnictwo PAN, Wrocław (Poland).
- [5] Kirillov, I.I., Faddějev, I.P., Cigler, Ch.Ch. (1968): *Energomašinstrojenije*, No. 6.
- [6] Gardner, G.C. (1963): *Events leading to erosion in the steam turbine*. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 178, pp. 593-601.
- [7] Bowden, F.P., Brunton, J.H. (1961): *The Deformation of Solids by Liquid IMPact at Supersonic Speed*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 263, The Royal Society Publishing, London (UK), pp. 433-450.
- [8] Bartoš, O., Měšťanová, L. (2019): *Povlakovaná lopatka v experimentálním tunelu*. České vysoké učení technické v Praze, Praha.

O PROJEKTU CESEN NAPOSLED

ABOUT THE CESEN PROJECT FOR THE LAST TIME

Pavel Polach

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

Abstrakt

V příspěvku je uveden výčet nejvýznamnějších výsledků řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (akronym CESEN), příklady jejich aktuálního uplatnění a perspektiv jejich dalšího rozvoje.

Abstract

The paper presents list of the most significant results of the solution 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), examples of their current application and the perspectives for their further development.

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 bylo úspěšně dokončeno v roce 2019. Po závěrečném oponentním řízení v listopadu roku 2020 hodnotilo předsednictvo Technologické agentury České republiky projekt CESEN se stanoviskem „V - Vynikající výsledky projektu (s mezinárodním významem atd.)“.

Řešitelskými pracovišti projektu byly společnosti 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*.

Hlavním cílem projektu bylo 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.

V následující kapitole je uveden výčet výsledků řešení projektu CESEN s největším aplikačním potenciálem, v další kapitole jsou uvedeny příklady jejich aktuálního uplatnění a perspektiv jejich dalšího rozvoje.

Významné výsledky dosažené při řešení projektu [2]

Dosažené výsledky řešení projektu (celkem 75 odborných výsledků) lze členit na výsledky ve formě vyvinutých a vyrobených zařízení, výsledky ve formě služeb, výsledky ve formě vyvinutých metodik a návrhů řešení konkrétních problémů technické praxe a výsledky ve formě vytvořeného softwaru.

Vyvinutá a vyrobená zařízení:

- instalace zkušebního zařízení pro ověření skutečných statických a dynamických charakteristik radiálních kluzných segmentových ložisek,
- prototypová řada dynamických budičů s usměrněnou silou 40 kN, 60 kN a 90 kN, které slouží pro provádění dynamických zkoušek základů parních turbín (viz obr. 1),
- prototypová řady radiálních kluzných segmentových ložisek pro průmyslové turbíny MTD 25, MTD 30 a MTD 60 z produkce Doosan Škoda Power s.r.o.
- prototyp referenčního povlaku vhodného pro termovizní měření za vysokých teplot,
- zařízení pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek,

- zařízení pro kontrolu trubek tepelných výměníků pomocí vysokootáčkové vnitřní sondy na vířivé proudy.



Obr. 1: Dynamické budiče s usměrněnou silou (90 kN vlevo, 40 kN vpravo nahoře a 60 kN vpravo dole), které slouží pro provádění dynamických zkoušek základů parních turbín

Poskytnuté služby:

- dynamické zkoušky základů energetických bloků v elektrárnách ČEZ, a. s.,
- inovace a optimalizace systému pro sběr, archivaci, distribuci a automatické vyhodnocování diagnostických dat z energetických zařízení ČEZ, a. s.,
- zapracování metodik predikce životnosti energetických systémů a zařízení do řídicí dokumentace ČEZ, a. s.

Vyvinuté metodiky a návrhy řešení konkrétních problémů technické praxe:

- metodika měření dynamických vlastností základů rotorových soustav parních turbín,
- metodika modelování vibrací perturbovaných olopatkovaných disků parních turbín,
- nové „nestandardní“ metodiky analýzy stupně degradace materiálů používaných v energetickém strojírenství – hodnocení změn mikrostruktury vysokolegovaných ocelí po creepu metodou replik, hodnocení degradace vlastností materiálu pomocí elektrochemických měření, hodnocení degradace materiálu rentgenovou analýzou, porovnání výsledků měření klasickými a zrychlenými creepovými zkouškami (ACT), měření žáropevnosti metodou „Small Punch Creep Tests“ (SPCT) a hodnocení lokální koroze dílů parních turbín,
- metodika pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti kovových materiálů,
- metodika pro stanovení J-R křivky kovových materiálů z výsledků penetračního testu,
- metodika pro určování základních mechanických vlastností vybraných kovových materiálů z výsledků penetračních testů použitím neuronových sítí,
- metodika termovizního měření v systému prediktivní údržby energetických zařízení,
- metodika termografického měření meze únavy materiálu,
- sestavení optimalizačních matic nástřikových parametrů pro vybrané materiály žárově stříkaných povlaků,
- nalezení nových materiálů žárově stříkaných povlaků (zejména na bázi slitin Co a Ni), které jsou vhodné jako ochrana proti vysokoteplotní korozi v agresivních prostředích,
- optimalizace rozhodování o opravách nebo výměnách komponent energetických zařízení,

- metodika pravděpodobnostního hodnocení rizik a životnosti parních turbín a dalších významných konstrukčních celků energetických zařízení,
- metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek,
- metodika pro kontrolu trubek tepelných výměníků pomocí vysokootáčkové vnitřní sondy na vířivé proudy.

Vytvořený software:

- komplexní MKP model dynamických vlastností rotorových soustav parních turbín,
- software pro řešení vibrací turbosoustrojí a jeho jednotlivých komponent (pravidelné i porušené olopatkované disky, turbínové a generátorové rotory, lože, ložiska a ucpávky),
- systém „Residual Fatigue Life of Blades“ (RFLB) pro monitorování zbytkové životnosti lopatek na základě měření,
- software pro predikci životnosti energetických zařízení.

Příklady aktuálního uplatnění a perspektiv rozvoje dosažených výsledků

- Nové metody experimentální a výpočtové identifikace dynamických vlastností základů energetických zařízení a radiálních kluzných ložisek parních turbín jsou využívány v rámci standardního procesu návrhu rotorových soustav parních turbín Doosan Škoda Power s.r.o. Dále jsou dosažené poznatky využívány při řešení stávajících provozních problémů v klasických a v jaderných elektrárnách.
- Nové metodiky výpočtů vibrací rotorů a olopatkovaných disků s nelineárními vnitřními vazbami jsou ve formě programového vybavení, metodiky a popsání algoritmů využívány výrobcí komponent parních turbín nebo celých turbosoustrojí. Dále budou přístupy k modelování olopatkovaných disků využity k hlubším analýzám jejich nestabilního chování při provozu turbíny. Důraz bude kladen na propojení výsledků navazujících metod pro analýzu různých typů nestabilit typu „flutter“.
- Nová metoda výpočtů proudění pro optimalizaci turbínových stupňů s přetlakovým olopatkovaním podporuje vývoj přetlakových stupňů parních turbín Doosan Škoda Power s.r.o. Modelování aeroelastických jevů a samobuzeného kmitání soustavy (olopatkovaný disk)/(proudící médium) umožňuje analyzovat riziko samobuzeného kmitání již ve fázi návrhu oběžných lopatek, a tím přijetí případné nápravy před jejich výrobou a nasazením v provozu, což přispívá ke zvýšení provozní spolehlivosti NT dílů a k úspoře případných nákladů na výměnu lopatek.
- Vyvinutý systém pro monitorování životnosti lopatek RFLB je modifikován a bude nasazen v jaderné elektrárně Dukovany. Nejprve v testovacím provozu, poté pro online diagnostiku stavu poškození lopatek nízkotlakých (NT) dílů.
- Vyvinuté nové povlaky součástí a komponent ve formě (zejména) žárových nástřiků jsou vhodné pro aplikace v energetickém průmyslu a současně existuje potenciál uplatnění těchto typů povlaků i v mnoha dalších průmyslových aplikacích, vyžadujících obdobné vlastnosti – odolnost proti dynamickému namáhání, vysoké teplotě či korozi.
- Výzkum a vývoj v oblasti aplikace žárově stříkaných povlaků je zaměřen zejména na vývoj ochranných povlaků pro korozně agresivní prostředí geotermálních elektráren a na vývoj nástřiku povlaků odolných proti erozi vodními kapkami. Aktuálně je realizován: 1. vývoj řešení ochrany povrchu a aplikace funkčních povlaků nanosených technologiemi, umožňujícími nástřik v místě aplikace, především technologií nástřiku elektrickým obloukem (TWAS), 2. vývoj komplexních řešení typu multivrstvých povlaků s vysokou odolností proti korozi a opotřebení a 3. vývoj aplikací pro energetický průmysl, využívajících kinetický nástřik za studena („cold spray“).

- Výsledky z oblasti výzkumu a vývoje nových zkušebních metod pro hodnocení materiálových vlastností ocelí vedly k vypracování několika certifikovaných metodik, které jsou nyní nabízeny ke komerčnímu využití provozovatelům energetických zařízení v České republice i v zahraničí.
- Rozvoj metodiky na provádění penetračních testů (SPT) bude zaměřen na širší využití neuronových sítí pro diagnostiku materiálů používaných v energetice s možností získání standardních i nekonvenčních mechanických vlastností. Probíhající standardizace metody SPT v Evropě a v ASTM sjednocuje postupy provádění tohoto testu a umožní využití vypracovaných certifikovaných metodik i pro materiály používané v jaderných elektrárnách v příslušných státech.
- V praxi jsou uplatňovány metody hodnocení degradace materiálu (koroze, únava, creep) včetně výpočtů zbytkové životnosti komponent energetických zařízení. Vybrané výsledky jsou využívány zejména pro Doosan Škoda Power s.r.o. a ČEZ, a. s.
- Podle vyhotoveného harmonogramu probíhá postupné rozšiřování modelů včasného varování (EWS/CBM) upozorňující na nestandardní chování energetických zařízení a jejich důležitých konstrukčních celků (kotel, turbogenerátor, turbonápáječka, elektro- napáječka, kondenzátní čerpadlo, ventilátorový mlýn, kouřový ventilátor, vzduchový ventilátor, recirkulační ventilátor) elektráren provozovaných ČEZ, a. s.
- Systém pro on-line měření torzních kmitů je provozován na obou turbogenerátorech 1000 MW v jaderné Elektrárně Temelín a je dále zdokonalován. Připravuje se jeho rozšíření na turbogenerátory v jaderné Elektrárně Dukovany.
- Metody termografického měření byly implementovány do softwaru LabIR, který je komerčně nabízen (podrobnosti jsou uvedeny na www.labir.eu). Dosažené poznatky jsou využívány v rámci profesního vzdělávání, které realizuje pracoviště Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni v oblasti termodiagnostiky pod hlavičkou Schwáleného školicího pracoviště ATD ČR (Asociace technických diagnostiků České republiky).
- Metodické postupy hodnocení rizik a predikce životnosti komponent a konstrukčních celků energetických zařízení jsou využívány zejména ve společnosti ČEZ, a. s.
- Vyvinutý magnetizační zdroj na kontrolu krátkých lopatek turbín přináší zvýšení jejich spolehlivosti a životnosti. Zkvalitňování kontroly vyráběných lopatek je jednou z cest ke zvýšení spolehlivosti turbosoustrojí.
- Vyvinuté rotační sondy a sondy na kontrolu zaválcování trubek jsou a budou využity převážně v rámci kontrolních činností u provozovatelů trubkových výměníků. Hlavní využití vyvinutých sond je v energetice, v teplárenství a v chemickém průmyslu.

Závěr

V příspěvku je uveden výčet nejvýznamnějších výsledků řešení projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ dosažených při řešení projektu, příklady jejich aktuálního uplatnění a perspektiv jejich dalšího rozvoje.

Literatura

- [1] Polach, P. (2012): Energetické centrum kompetence. *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., Prantnerová, M., Houdková, Š., Schubert, J., Polcar, P. (2020): Významné výsledky řešení projektu CESEN. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní (online), str. 81-86. ISBN 978-80-261-0959-4

PILOTNÍ APLIKACE METODIK PRO OPTIMALIZACI DIAGNOSTIKY A ÚDRŽBY VÝROBNÍCH BLOKŮ

PILOT APPLICATIONS OF METHODOLOGIES FOR OPTIMISATION OF DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF POWER UNITS

Jana Marková ^{a)}, Klára Kotassková ^{b)}, Jan Mlčoch ^{a)}, Kamil Prešl ^{c)} a Miroslav Sýkora ^{a)}

^{a)} České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav

^{b)} ÚAM Brno, s.r.o.

^{c)} ČEZ, a. s.

Abstrakt

Příspěvek popisuje pilotní aplikace čtyř certifikovaných metodik zpracovaných v rámci Národního centra pro energetiku v roce 2020. Metodiky poskytují nástroje pro podporu dosažení dlouhodobé dostupnosti výrobních bloků. Pilotní aplikace se zaměřuje na vybranou tepelnou elektrárnu. Nejprve se ověřuje kategorizace sledovaných zařízení z hlediska kritičnosti. Dále se rozhoduje, zda je potřebné některé z vybraných zařízení podrobit analýze poruchovosti a účinnosti, a ukazuje se způsob provedení této analýzy. Na závěr se diskutuje, zda je pro sledování zařízení potřebné upravit nastavení systému diagnostiky a údržby. Výsledky pilotních aplikací poskytují zpětnou vazbu ohledně aktuální kategorie zařízení na základě vyhodnocení provozních dat a doporučení týkající se změn údržby a diagnostiky pro dosažení dlouhodobé dostupnosti zařízení a výrobních bloků.

Abstract

The contribution describes pilot applications of four certified methodologies developed within the National Centre for Energy in 2020. The methodologies are intended to support achieving long-term serviceability of production units. The pilot application focuses on a selected thermal power plant. First, the categorization of monitored devices is verified with respect to risks associated with their operation. It is further decided whether any of the selected devices should be subjected to a detailed failure mode and effects analysis, and the implementation of such analysis is demonstrated. It is further discussed whether or not the diagnostic and maintenance systems need to be adjusted for the devices under investigation. The pilot application then provides important feedback about selecting critical devices and whether or not the applied diagnostic and maintenance systems are optimal for achieving the long-term serviceability of power units.

Úvod

Čtyři metodiky připravované v rámci Národního centra pro energetiku (NCE) a certifikované v roce 2020 reagují na aktuální potřebu provozovatelů bloků klasických elektráren (KE) a tepláren optimalizovat plánování preventivní a prediktivní údržby. Metodiky usnadňují:

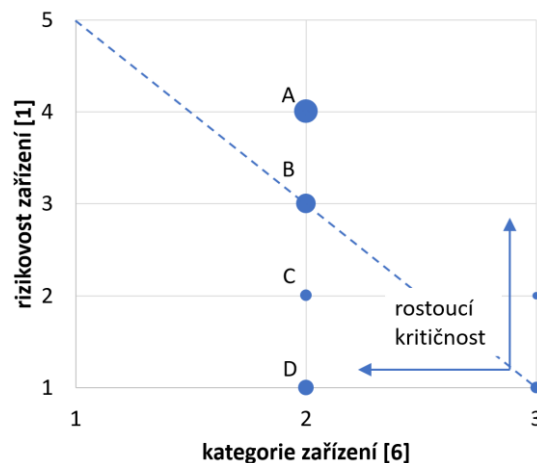
1. klasifikovat zařízení z hlediska kritičnosti (metodika [1] – *M1*),
2. identifikovat kritická zařízení konkrétního bloku – *M2* [2],
3. určit kritické degradační mechanismy – *M3* [3],
4. upravit nastavení systémů diagnostiky a údržby (programů údržby PÚ) – *M4* [4].

Poskytují analytické podklady pro hodnocení technického stavu experty na jednotlivá výrobní zařízení.

Řešení NCE v roce 2021 se zaměřuje na pilotní ověření a aplikace čtyř metodik s využitím provozních dat se zaměřením na blok KE. Cílem je prověřit aplikovatelnost postupů v metodikách, zpracovat doporučení pro sběr vstupních dat a připravit algoritmy pro softwarovou implementaci postupů podle metodik.

Metodika analýzy rizik pro stanovení kritičnosti zařízení výrobních bloků (M1)

V rámci aplikace *M1* je cílem ověřit nastavení kategorizace zařízení podle zjednodušené klasifikace na základě dopadů a podle podrobnějšího hodnocení s uvažováním poruchovosti. U vybraného bloku KE se analyzuje kritičnost tlakového systému kotle (TSK – zařízení s nejvyšší kritičností ze sledovaných zařízení), nezálohovaného kouřového ventilátoru a skupiny nezálohovaných 6kV motorů (středně kritická zařízení) a dopravníků (zařízení s nízkou kritičností). Obrázek 1 ukazuje příklad porovnání hodnocení kritičnosti (rizikovosti) zařízení podle metodiky používané dlouhodobě v praxi [6] a podle nové metodiky *M1* [1]. Velikost bodů naznačuje, kolik zařízení spadá pod konkrétní hodnocení.



Obr. 1: Příklad porovnání hodnocení kritičnosti zařízení podle metodik [1, 6]

Ukazuje se, že kritičnost zařízení je možné zjednodušeně hodnotit na základě dopadů poruchy podle [6]. V podrobnějším postupu podle *M1* se pak přihlíží i k poruchovosti. Z obr. 1 vyplývá, že hodnocení vedou k obdobným závěrům – například pro zařízení klasifikována jako středně kritická podle [6]:

- pro skupinu zařízení B (motory OXI kompresoru a oběhového čerpadla absorbéru; ekonomizér a přehřívák TSK) vedou obě metodiky ke střední kritičnosti,
- pro skupinu A (motory ventilátorového mlýnu, chladícího čerpadla a elektronapáječky; přehřívák a výparník TSK) naznačuje podrobnější postup *M1* vyšší kritičnosti a pro skupinu C (kouřový ventilátor; motory kouřového, vzduchového a recirkulačního ventilátoru; gumový korečkový dopravník) naopak nižší.

Pouze pro zařízení D (dopravníky; napájení, převáděcí potrubí a regulace teploty páry TSK) indikuje podrobný postup *M1* významně nižší kritičnost. Toto je však způsobeno omezenými vstupními daty pro hodnocení *M1*; v tomto případě se uvažují za směrodatnou klasifikace podle [6].

Metodika rozdělení zařízení výrobních bloků elektráren pro řízení životnosti a modifikaci (M2)

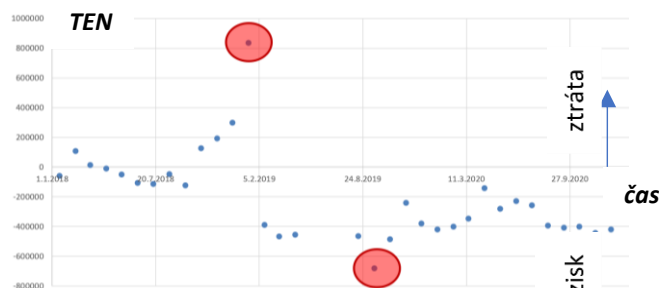
Zatímco *M1* slouží jako podklad pro hodnocení kritičnosti typů zařízení provozovatele (obecně, například pro všechny TSK), *M2* hodnotí kritičnost konkrétního zařízení na základě dostupnosti, poruchovosti a technickoekonomických normativů (TENů); viz také [5]. Analýza vazeb mezi těmito klíčovými indikátory pro údržbu (poruchovost a dostupnost) a řízení provozu (TENy) je jednou z klíčových součástí pilotního ověřování.

Podniková norma [7] uvádí přehled základních technických veličin s přímým vlivem do energetických ztrát – TENů (například obsah O₂ ve spalinách, střední teplota emisní páry, teploty přehřáté páry na kotli, spalin nebo napájecí vody, nedopaly). TENy se v provozu průběžně monitorují. Odchytky TENů mohou být způsobené:

- technickým stavem zařízení (opotřebením), a tedy v přímé souvislosti s nastavením PÚ,
- způsobem provozování zařízení,
- nedosažením projektových hodnot při uvedení zařízení do provozu,
- venkovními podmínkami (například teplota nebo vlhkost),
- změnou kvality palivové základny atd.

Například nepříznivé hodnoty O_2 mohou být způsobeny provozně (vzduchovým režimem kotle) nebo zařízením (netěsný zadní tah kotle způsobující přísávání vzduchu). Mezi zařízení, jejichž stav a provoz nejvíce ovlivňují TENy, patří zařízení TSK včetně řídicího systému, mlýny, kondenzátor a vysokotlaký ohřívák.

Obrázek 2 ukazuje extrémní hodnoty TENu v zisku a ve ztrátě, které mohou vyvolat analýzu poruchovosti podle *M3*. Optimální hodnota normativu je stanovena na základě dlouhodobých zkušeností a z vypořizovaného chování zařízení např. pro určitý výkon nebo tlak páry. Pokud je zařízení provozováno dlouhodobě mimo normální provozní podmínky (tj. mimo optimální hodnotu TENu), může to mít negativní vliv na okamžitou disponibilitu zařízení nebo na jeho životnost.



Obr. 2: Ukázka extrémních hodnot TENů

Předpokládá se například, že netěsnost kondenzátoru je nejprve indikována nižší účinností (tj. projevuje se v hodnotě TENu). Následně ale vede k zanesení kotle a potřebě odstávky. Analýzou trendu TENů je tedy v tomto případě možné předejít poruše. V současné době se proto analyzuje, zda informace o TENech lze využít k plánování a hodnocení údržby.

Dalším důležitým indikátorem podle *M2* je disponibilita, kterou ovlivňují výpadky (korektivní opravy) a odstávky (preventivní opravy). V současné době probíhají analýzy, jak související informace zohlednit při optimalizaci programů údržby (PÚ).

Aplikace dvou alternativních postupů *M2* [5] s využitím provozních dat pro čtyři konkrétní TSK ukazuje, že tyto postupy vedou k obdobným výsledkům:

1. Z celkem hodnocených 28 komponent TSK indikoval *postup 1* sedm zařízení, jejichž chování je kritičtější oproti očekávanému stavu, tyto komponenty je zapotřebí podrobit další analýze popsané v metodice *M3*, zatímco zjednodušený *postup 2* ukazuje na základě neuspokojivých hodnot pro indikátory dvou bloků čtrnáct zařízení. Chybějící informace o disponibilitě zařízení (klíčové pro *postup 1*) tedy vedou k tomu, že je analýze poruchovosti potřebné podrobit více zařízení.
2. Nejkritičtější komponenty TSK jsou výparníky #3 a #4 – oba postupy shodně identifikovaly tyto za problematické, zatímco výparníky #1 a #2 nevyžadují detailní analýzu poruchovosti podle *M3*.
3. Na rozdíl od *postupu 2* opírajícího se především o blokové indikátory identifikoval *postup 1* také jeden přehřívák a jeden přihřívák – jedná se o zařízení, u kterých je možné zdokonalit PÚ, ačkoli jsou v blocích s uspokojivou blokovou disponibilitou.

4. V současné době jsou k dispozici pouze informace o dostupnosti bloků. Pro výstižnější stanovení kritičnosti zařízení a hodnocení PÚ se doporučuje začít systematicky sledovat dostupnost jednotlivých zařízení.

Zdůrazníme, že tyto závěry jsou zatím předběžné, protože pro hodnocení nebyly k dispozici klíčové vstupy – limitní hodnoty pro poruchovost a dostupnost zařízení.

Hodnocení kritičnosti poruch zařízení výrobních bloků elektráren (M3)

M3 vychází z dvou indikátorů kritičnosti poruchy:

- rizika – očekávaná doba na korektivní opravy sledovaného typu poruchy během referenční doby,
- účinnosti současného programu údržby.

Na základě těchto dvou indikátorů se stanovuje potřeba změny PÚ sledovaného zařízení. Obrázek 3 ukazuje hodnocení kritičnosti poruch výparníků #1 až #4. Současný stupeň PÚ je druhý nejvyšší. Protože je však u výparníků #3 a #4 identifikována nejvyšší úroveň rizika R5, vede hodnocení podle M3 k doporučení, že u těchto výparníků je „vysoká potřeba změny PÚ“. Potvrzují se tedy výsledky z aplikace M2.

Výparník	Degradační mechanismus	Faktor ovlivňující rychlost degradace	Současný PÚ	Počet poruch / rok	Počet hodin na opravu	Počet hodin na opravu za rok	Riziko (R)	Potřeba změny PÚ podle tab. 3
#1	Netěsnost výparníku	Staří, TEN (teplota páry)	s rozšířenou diagnostikou a údržbou	0,33	89	29,7	R3	Z2
#2				0,00	89	0,0	R1	Z1
#3				3,00	89	267,0	R5	Z4
#4				4,67	89	415,3	R5	Z4

Z5 - okamžitá

Z4 - vysoká

Z3 - střední

Z2 - nízká

Z1 - beze změny

Potřeba změny

Obr. 3: Hodnocení kritičnosti poruch výparníků #1 až #4

Metodika predikce technického stavu a optimalizace rozhodování o údržbě (M4)

V závěrečném hodnocení podle M4 se dále zohledňuje aktuální stav zařízení (a uvažuje se tedy možný rozvoj degradačních mechanismů). U kritických výparníků #3 a #4, které jsou na základě výsledků diagnostik v neuspokojivém stavu, vede aplikace metodiky k doporučení „okamžité změny PÚ s ohledem na stav zařízení“.

Předložený příspěvek popisuje pouze dílčí výsledky pilotních aplikací metodik M1-M4. Další rozbory se mj. zaměřují na analýzy dlouhodobého vývoje i okamžitých trendů dostupnosti výrobních bloků a porovnání dostupnosti pro bloky s dominantní preventivní údržbou a pro bloky, u kterých se provádějí především korektivní opravy.

Shrnutí a předběžná doporučení pro využití metodik v praxi

Příspěvek popisuje pilotní aplikace čtyř certifikovaných metodik [1-4]. Metodiky reagují na aktuální potřebu identifikovat zařízení, u kterých by na základě analýzy dostupnosti, poruchovosti, TENů, současného nastavení PÚ a současného stavu zařízení mělo dojít ke změně PÚ. Poskytují nástroje pro podporu dosažení dlouhodobé dostupnosti výrobních bloků. Předběžné výsledky pilotních aplikací ukazují, že klíčovými indikátory pro řízení spolehlivosti jsou dostupnost, poruchovost a stav zařízení z hlediska úseku údržby a diagnostiky. V současné době se diskutuje o možnosti použití TENů (úsek řízení provozu) při hodnocení PÚ.

Na základě průběžných výsledků lze formulovat následující předběžná doporučení:

1. Aplikace metodik může identifikovat zařízení, u kterých má dojít k optimalizaci nastavení PÚ. Hodnocení podle metodik poskytuje obecné indikace, že PÚ není efektivní a je potřeba jej změnit.
2. Pro efektivní uplatnění metodik v praxi se doporučuje sbírat informace o dostupnosti zařízení a nikoli pouze o dostupnosti bloku. Dále se doporučuje systematicky sledovat stav zařízení (může být dostatečná alespoň přibližná klasifikace například na základě počtu provozních hodin zařízení).
3. V praxi se průběžně evidují poruchy s dopadem do dostupnosti. Z důvodu lepšího přehledu o dalších ekonomických nákladech (mimo dopad do dostupnosti) se doporučuje evidovat i poruchy zálohovaných zařízení; například porucha mlýnu může souviset s významnými náklady na opravu, ale neeviduje se, pokud je v době poruchy namleto.
4. Pro efektivní aplikace metodik je nezbytné stanovit mezní hodnoty pro poruchovost a dostupnost zařízení. Doporučuje se také stanovit mezní hodnoty pro TĚNy (pro potřeby hodnocení PÚ).

Očekává se, že aplikace metodik ve střednědobém horizontu napomůže k alespoň částečnému odstranění opakovaných (systematických) poruch (aplikace zřejmě nebudou mít vliv na mimořádné poruchy).

Poděkování

Príspevek byl zpracován v rámci řešení Národního centra pro energetiku TN010000007, DP6 „Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“, PB6.3 „Pilotní ověření metodik pro hodnocení kritičnosti a rozhodování o údržbě na provozních datech“ podporovaného Technologickou agenturou České republiky.

Literatura

- [1] Marková, J., Sýkora, M., Mlčoch, J., Prešl, K., Šťastná (Kotassková), K. (2020): *Metodika analýzy rizik pro stanovení kritičnosti zařízení výrobních bloků elektráren*. Certifikovaná metodika, České vysoké učení technické v Praze, ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o.
- [2] Marková, J., Sýkora, M., Mlčoch, J., Prešl, K., Šťastná, K. (2020): *Metodika rozdělení zařízení výrobních bloků elektráren pro řízení životnosti a modifikaci*. Certifikovaná metodika, České vysoké učení technické v Praze, ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o.
- [3] Marková, J., Sýkora, M., Mlčoch, J., Prešl, K., Šťastná, K. (2020): *Hodnocení kritičnosti poruch zařízení výrobních bloků elektráren*. Certifikovaná metodika, České vysoké učení technické v Praze, ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o.
- [4] Marková, J., Sýkora, M., Mlčoch, J., Prešl, K., Šťastná, K. (2020): *Metodika predikce technického stavu a optimalizace rozhodování o údržbě*. Certifikovaná metodika, České vysoké učení technické v Praze, ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o.
- [5] Marková, J., Mlčoch, J., Sýkora, M., Prešl, K., Šťastná, K. (2020): *Metodiky pro optimalizaci diagnostiky a údržby zařízení výrobních bloků*. All for Power, roč. 14(3/2020), str. 62-64. ISSN 1802-8535
- [6] ČEZ, a. s. (2019): *Řízení rizik v divizi klasická energetika*. Podniková norma, SKČ_ME_0235r00, ČEZ, a. s.
- [7] ČEZ, a. s. (2015): *Řízení účinnosti a emisí*. Podniková norma, ČEZ_TST_0044r02z2, ČEZ, a. s.

VaV PROJEKTY CVŘ PRO OBLASTI NEDESTRUKTIVNÍCH METOD A POVRCHOVÝCH ÚPRAV V ROCE 2021

R&D PROJECTS OF THE CVŘ FOR NON – DESTRUCTIVE METHODS AND SURFACE TREATMENTS IN 2021

Jaroslav Brom, Jana Veselá, Jan Patera, Petr Vlček, Pavel Kůs, Josef Strejcius a Michal Chocholoušek

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

V článku jsou uvedeny informace o výsledcích VaV projektů řešených ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. v roce 2021 v rámci projektu NCK pro energetiku, dílčího projektu DP6 „Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“, pracovního balíčku PB6.2 „Perspektivní diagnostické metody“, a dílčího projektu DP7 „Materiály a materiálové technologie pro moderní energetické aplikace“, pracovního balíčku PB7.1 „Povrchové úpravy komponent v JE a KE“. Jsou uvedeny hlavní výstupy projektů a návrhy činností pro pokračování NCK v roce 2022.

Abstract

The article provides information on the results of R&D projects solved in the Centrum výzkumu Řež s.r.o. research organization in 2021 within the NCK project for energy, sub-project DP6 “Development of diagnostic methods for characterization of key components of energy units”, work package PB6.2 “Perspective diagnostic methods”, and sub-project DP7 “Materials and material technologies for modern energy applications”, work package PB7.1 “Surface treatment of components in NPPs and NPPs”. The main outputs of projects and proposals of activities for the continuation of the NCK in 2022 are presented.

1. Projekty pracovního balíčku PB6.2

1.1 Podprojekt HT PAUT pro JE

Cílem podprojektu je vyvinout certifikovanou metodiku pro zkoušení homogenních svařových spojů materiálů sekundárního okruhu JE a to pro materiály 11373 a 12022.1 metodou HT (vysokoteplotní) PAUT do teploty 200 °C (obr. 1).



Obr. 1: Zkušební systém HT PAUT

Pro dosažení cílů je realizováno prokázání detekovatelnosti vad typu EDM pro materiál 11373 a typu PISC-A pro materiál 12022.1 s definovanými rozměry (délka a výška). V rámci vývoje bude dále stanovena výška vady v rozsahu teplot 50 až 200 °C. Všechna uvedená měření budou porovnávána s výchozím měřením za pokojové teploty.

Pro certifikaci metodiky bude vedle vypracování inspekčního postupu zpracováno technické zdůvodnění.

1.2 Podprojekt NEWS pro JE

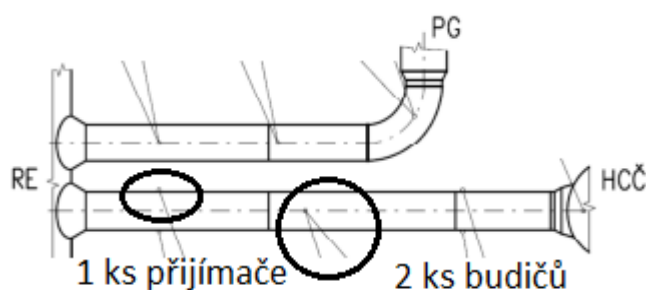
Cíle podprojektu jsou následující:

A) Ověření metody NEWS, které proběhne na zkušebních tělesech z austenitické oceli z plné trubky s trhlinou v rozsahu:

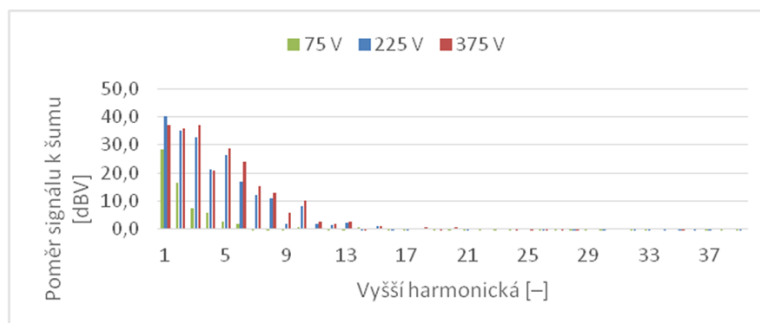
1. ověření vlivu vazby na výsledky – opakované měření na stejném ZT po demontáži a opětovném přivaření snímačů,
2. ověření vlivu na výstupy z metody NEWS při změnách vzájemné pozice snímačů a trhliny,
3. ověření buzení dvou frekvencí jedním snímačem.

B) Pilotní měření na JE Temelín pomocí snímačů systému LEMOP.

Předběžné výsledky z pilotního měření s využitím snímačů systému ACMS/LEMOP na ETE 2. bloku – viz obr. 2 a obr. 3 ukazují na použitelnost metody NEWS na hlavním cirkulačním potrubí na detekci trhlin mezi budiči a přijímači ultrazvukového signálu (přítomnost trhlín se projevuje přítomností vyšších harmonických frekvencí).



Obr. 2: Umístění ultrazvukových snímačů na ETE 2. bloku na 1. hlavním cirkulačním potrubí



Obr. 3: Spektrum ultrazvukového signálu z měření na ETE 2. bloku bez přítomnosti vyšších harmonických frekvencí

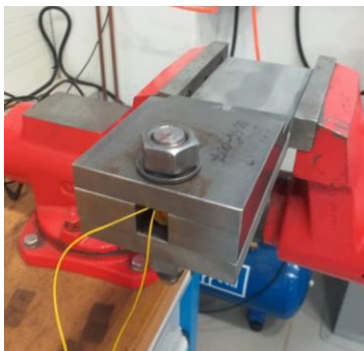
1.3 Podprojekt MMM pro JE

Cíle podprojektu jsou následující:

- Stanovení závislosti napětí ve svorníku a hodnot získaných metodou MMM (současné měření MMM s tenzometry) pro typ svorníku zvoleného v projektu.
- Stanovení vlivu místa měření pro metodu MMM na zvoleném přírubovém spoji na posouzení stavu přírubového spoje – posoudit nejvhodnější způsob měření příruby – měření přímo na dřívku svorníku nebo pojezdem po přírubě.
- Stanovení kritérií přípustnosti na zvoleném přírubovém spoji – nadefinování, kdy bude nutné pro daný případ rozptýl naměřených hodnot přípustný a kdy nikoliv – navrhnout přehled testů, které ověří citlivost metody na jednotlivé nevyhovující stavy přírub např.: nedotažený svorník, přetažený svorník, svorník utahovaný přes závit, poškozený svorník s trhlinou, poškozený závit svorníku, nečistoty v dělicí rovině příruby apod.

- Nadefinování požadavků na postup ověření stavu svorníků a přírub metodu MMM.

Výstupem z projektu bude ověřená technologie na použití metody MMM pro zvolený přírubový spoj v projektu.



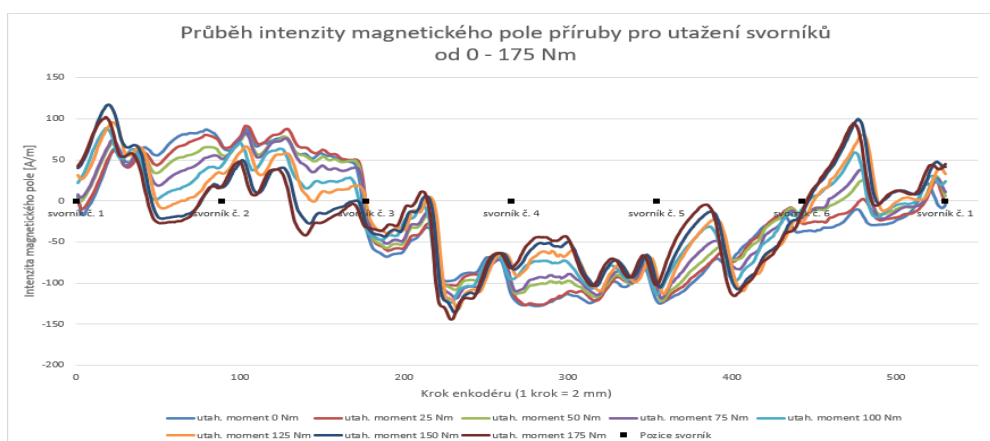
Obr. 4: Stand šroubového spoje



Obr. 5: Stand přírubového spoje

Na obr. 4 je ukázán stand šroubového spoje a na obr. 5 stand přírubového spoje.

Předběžné výsledky ukazují na citlivost metody MMM (veličiny intenzity magnetického pole) na jednotlivé nevyhovující stavy přírubového spoje. Použití metody MMM bude vyžadovat změření vlastností svorníků a všech stavů daného přírubového spoje (před utahováním, po utahování, s médiem, po odstavení technologie apod.) pro hledání změn mezi jednotlivými stavy. Dále se ukazuje, že závislosti budou individuální pro jednotlivé typy přírubových spojů. Z výše uvedených důvodů bude vhodné metodu MMM používat zejména u problémových přírubových spojů.



Obr. 6: Intenzita magnetického pole příruby stolice při postupném rovnoměrném protilehlém utahování svorníků od 0 do 175 Nm v pozici SZ

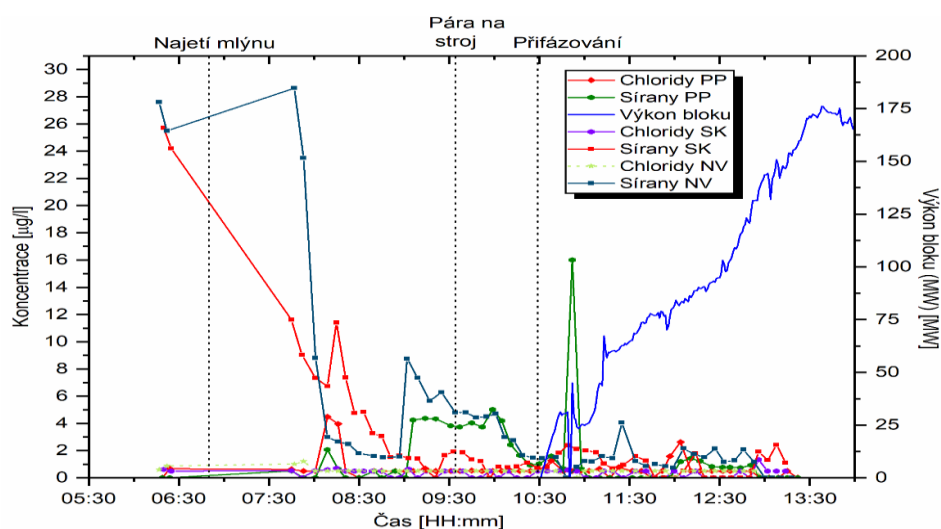
Obr. 6 ukazuje na změny intenzity magnetického pole v místě svorníků přírubového spoje, ke kterým dochází při jejich postupném utahování.

1.4 Podprojekt Chemie pro KE

Výstupem tohoto podprojektu bude výzkumná zpráva, která bude obsahovat ucelené soubory dat pro korozní analyty (chloridy a sírany) a korozní produkty včetně návrhů metodiky měření korozivních analytů a hodnocení korozních produktů pro elektrárny ETU2, EPR2 a EMĚ1. Návrhy metodik budou obsahovat obecný popis vzorků, na které je bude metodika aplikovat. Dále bude obsahovat popis metod a postup, jakým tyto metody budou aplikovány, popis zařízení a postup vyhodnocení naměřených dat.

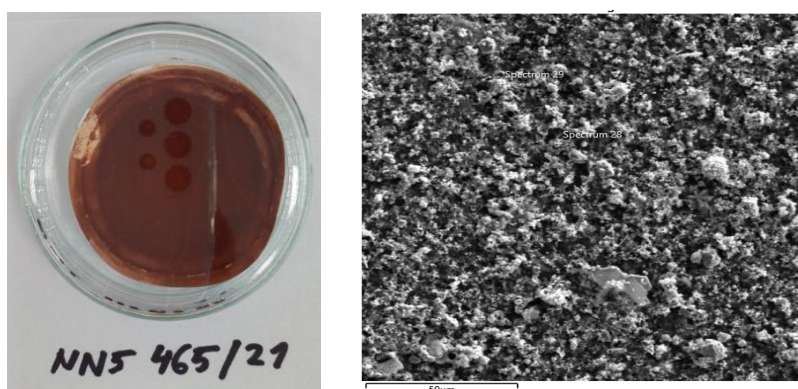
Používání metodik přispěje k optimalizaci provozování energetických bloků a možnosti k minimalizování či indikování možných poruchových stavů v okruhu.

V rámci podprojektu byly měřeny výkonové a nevykonové stavy (najíždění a odstávka bloku). Z hlediska provozování bloků se jeví právě nevykonové stavy jako kritické a ukazují se, že v těchto stavech je vyšší koncentrace chloridů a síranů než při výkonovém stavu. Stav během najíždění ukazuje obr. 7.



Obr. 7: Chloridy a sířany během najíždění ETU/21

V rámci podprojektu jsou také odebírány korozní produkty, které jsou následně měřeny pomocí technik SEM/EDX či Ramanovou mikroskopií (obr. 8).



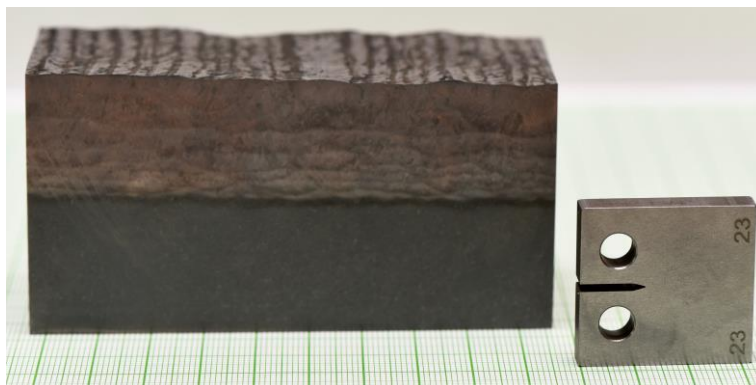
Obr. 8: Korozní produkt a měření pomocí SEM/EDX

1.5 Podprojekt Materiálové zkoušky pro KE

V rámci tohoto podprojektu se pro opravy lopatek vodních turbín realizují následující činnosti:

1. Zkoušky vysokocyklické únavy (VCÚ) svarových spojů používaných při opravách trhlin v lopatkách vodních trhlín. Jsou hodnoceny 2 varianty svarů oceli COR 13/4 lišící se použitým přídatným materiálem: A austenit (viz obr. 9), B: duplex. Budou stanoveny meze VCÚ svarových spojů ve vodě při střídavém namáhání a předpětí 330 MPa. Pro obě varianty svaru jsou dále stanovovány rychlosti šíření únavových trhlin ve vodě při hodnotách $R = 0,1$ a $0,7$ ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na rozkmitu faktoru intenzity napětí.
2. Vývoj metodiky stanovení obsahu reformovaného austenitu v oceli COR 13/4 po popuštění v intervalu 590 až 650 °C z polarizačních křivek, XRD nebo ve vysokém zvětšení na SEM.
3. Fraktografická analýza lomů oceli COR 13/4 v základním materiálu, svarovém kovu, v tepelně ovlivněné zóně.

4. Funkční vzorek zkušební korozní cely pro zkoušky VCÚ svarových spojů oceli COR 13/4 ve vodě.



Obr. 9: Svarový spoj oceli COR 13/4 s přidavným materiálem austenit a příslušný vzorek pro zkoušky vysokocyklické únavy svarového spoje ve vodě

2. Projekty pracovního balíčku PB7.1

2.1 Podprojekt TWAS pro KE

Cílem podprojektu je vývoj metodiky měření tloušťky žárových nástřiků zhotovených metodou TWAS.

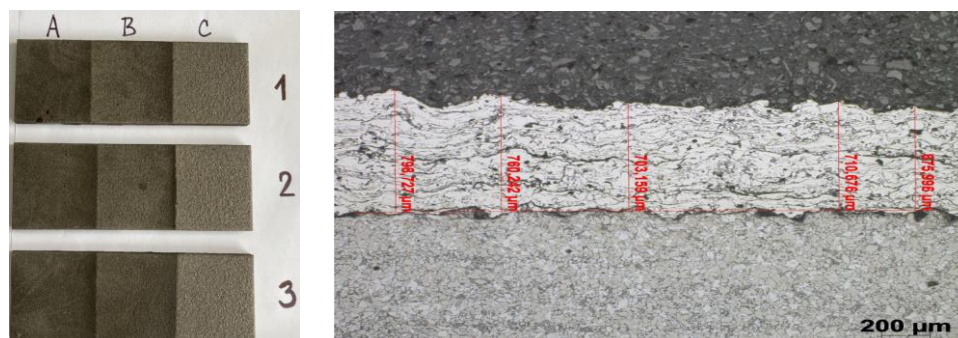
Na základě rešerše byla pro měření tloušťky povlaků TWAS vybrána metoda UT technika PEUT.

Vývoj metodiky je realizován na zkušebních tělesech (měrkách) s 3 různými tloušťkami nástřiku pro 3 různé typy materiálu povlaku (byly vybrány materiály vhodné z pohledu teplotní i abrazivní odolnosti: BTW 58, Eutronic ARC 545 a Inconel 625.). Pro každý materiál jsou zhotoveny 3 kusy měrek.

Pro vyhodnocení deponované tloušťky žárového nástřiku na základní materiál bylo realizováno 3D měření před a po nástřiku a metalografické změření tloušťky daného typu žárového nástřiku. Dále bylo provedeno metalografické hodnocení mikrostruktury.

Výstupy z vývoje metodiky:

- S ohledem na drsnost povrchu žárových nástřiků je měření PEUT bodové a měřená místa by měla být označena pro opakovaná měření a zachování kontinuity vyhodnocování případného úbytku tloušťky stěny v čase.
- Pro hodnocené typy materiálů žárových nástřiků a deponované tloušťky s maximem okolo 1 mm je nezbytné při měření PEUT získané hodnoty násobit přepočtovým koeficientem.
- Na obr. 10 je ukázaná mikrostruktura materiálu Inconel 625 stupně B měrky č. 1.



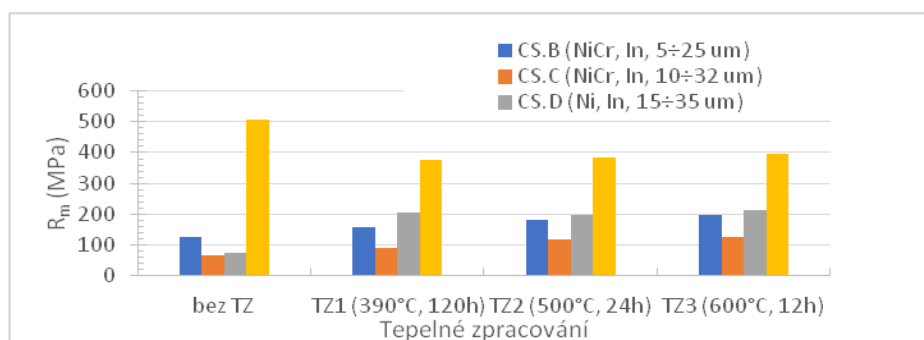
Obr. 10: Stupňové měrky Inconel 625 a mikrostruktura materiálu Inconel 625 – stupeň B stupňové měrky č. 1

2.2 Podprojekt Cold Spray pro JE

V rámci tohoto podprojektu probíhá ověření vlastností povlaku Cold Spray z prášku NiCr o dvou velikostech částic zhotoveného tryskou pro vnitřní nástřiky a z prášku Ni zhotoveného dvěma typy trysek (pro vnitřní a vnější nástřik) a vývoj metodiky nedestruktivního zkoušení pro vnější nástřiky z prášku NiCr a Ni).

Vývoj probíhá v rozsahu:

1. Výroba polotovarů pro měřky a zkušebních tělesa včetně jejich nástřiku.
2. Výroba měrek a těles z potrubí malých průměrů pro nedestruktivního zkoušení, výroba zkušebních těles pro ověření mechanických vlastností, potenciometrické zkoušky odolnosti proti korozi, testy odolnosti proti opotřeбенí a vlivu tepelného zpracování.
3. Vývoj metodiky nedestruktivního zkoušení – měření tloušťky nástřiku Cold Spray technikou PEUT.
4. Ověření mechanických vlastností vnitřních povlaků Cold Spray.
5. Ověření korozní odolnosti (potenciometrické zkoušky) pro nástřik Cold Spray z prášku Ni.
6. Ověření vlivu způsobu tepelného zpracování (TZ) na sledované materiálové vlastnosti Cold Spray nástřiků.



Obr. 11: Hodnoty meze pevnosti bez a po TZ pro různé typy prášku nástřiku CS

Na obr. 11 jsou ukázány hodnoty meze pevnosti bez a po různých průbězích TZ pro různé typy prášku pro zhotovení nástřiku CS a pro různé typy trysek (In pro vnitřní nástřik trubek, Ex pro nástřik „řádnou“ tryskou). Obecně lze konstatovat, že pro prášek NiCr roste po TZ mírně mez pevnosti, ale tažnost je cca nulová (stále křehké). Hodnoty meze pevnosti pro trysku In jsou nízké. U prášku Ni se po TZ materiál stane houževnatým (tažnost se zvýší z 0 na 2 až 25 % v závislosti na způsobu nástřiku), mez pevnosti je po TZ cca stejná, a to i pro nízké teploty TZ. CS zhotovený vnitřní tryskou In bez TZ má velkou pórovitost, má nízkou pevnost, ale TZ ji vylepšilo ze 75 na cca 200 MPa. Z tryska Ex vznikne pevný křehký nástřik (cca 500 MPa) a TZ to sice srazí na cca 400 MPa, ale tažnosti se zvednou z nuly na 15 až 30 %.

3. Návrh činností pro rok 2022

Pro rok 2022 navrhuje CVŘ VaV v oblastech:

1. Vývoj prototypu modulárního manipulátoru pro vizuální kontroly s možností připojení modulů pro další NDT kontroly.
2. Ověření vlastností povlaků NiCr a Ni zhotovených technologií Cold Spray po aplikování únavových zkoušek (teplotních a nízkocyklických) a povlaků NiCr při použití na opravy těsnících ploch.
3. Vývoj metodiky zkoušení metodou NEWS pro hlavní cirkulační potrubí a přípojeného potrubí po první uzavírací armaturu JE Temelín.

Předložený článek vznikl díky projektu podporovaného Technologickou agenturou České republiky TN01000007 v rámci programu Národní centra kompetence – 1. VS.

POTENCIÁL APLIKACE TECHNOLOGIE NÁSTŘIKU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

POTENTIAL OF TWIN WIRE ARC SPRAYING TECHNOLOGY FOR APPLICATION IN POWER INDUSTRY

Šárka Houdková, Marek Vostřák, Zdeněk Česánek, Jan Schubert, Sofia Kšiňanová a Jana Nadřová

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

Abstrakt

Technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem (TWAS – Twin Wire Arc Spray) umožňuje nanášet povlaky o tloušťkách přesahujících 1 mm, z širokého spektra materiálů, s vysokou produktivitou a možností aplikace i mimo specializovaná pracoviště. Tyto výhody, které v některých případech favorizují technologii TWAS oproti sofistikovanějším technologiím nástřiku jsou však vyváženy nižší kvalitou mikrostruktury naneseného povlaku. Analýza možností optimalizace depozičních parametrů nástřiku, kombinovaná s vhodným návrhem materiálu povlaku či více materiálů ve formě multivrstvy však poukazuje na potenciál dosažení funkčních vlastností povlaku naneseného technologií TWAS na dostatečnou úroveň, srovnatelnou s chováním povlaků nanesených konkurenčními technologiemi. Příspěvek představuje vybrané povlaky TWAS určené pro použití při kombinovaném namáhání, jejich základní mikrostrukturní, mechanické a funkční vlastnosti a demonstruje příklady jejich uplatnění v energetickém průmyslu.

Abstract

The Twin Wire Arc Spray (TWAS) technology allows the application of coatings with thicknesses exceeding 1 mm, from a wide range of materials, with high productivity and the possibility of application even outside specialized workplaces. However, these advantages, which, in some cases, favor TWAS technology over more sophisticated spray technologies, are compensated by the lower quality of the microstructure of the TWAS applied coating. However, the analysis of the possibilities of optimizing the deposition parameters, combined with a suitable design of the coating material or more materials in the form of a multilayer points to the potential to achieve the functional properties of the coating applied by TWAS to a sufficient level, comparable to the behavior of coatings applied by competing technologies. The paper presents selected TWAS coatings intended for use in combined stress, their basic microstructural, mechanical and functional properties, and demonstrate their use in power industry.

Úvod

Technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem (TWAS – Twin Wire Arc Spray) představuje v současnosti zavedenou a rozšířenou technologii žárového nástřiku. Její hlavní výhodou jsou nízké provozní náklady a mobilita, umožňující nanášení povlaků přímo na místě aplikace, a to i na velké konstrukce, bez nutnosti jejich demontáže. Vysoká produktivita technologii TWAS favorizuje pro nástřik rozměrných součástí. V energetickém průmyslu existuje řada konstrukcí a komponent, jejichž životnost může být aplikací ochranného povlaku výrazně prodloužena [1-3]. V mnoha případech se jedná o povrchy namáhané kombinovaným zatížením – mechanickým opotřebením v kombinaci s korozivním prostředím a vysokou teplotou. Kromě prvovýroby může být tato technologie použita pro renovaci již opotřebovaných nebo zkorodovaných součástí. Princip technologie TWAS, včetně jejích hlavních výhod je popsán např. v [4]: přídavný materiál ve formě drátu je podáván do nástřikového zařízení, kde je mezi špičkami drátu zapálen elektrický oblouk. Materiál na špičkách drátu je kontinuálně taven a plynem (obvykle tlakovým vzduchem) je unášen a urychlen směrem k povrchu povlakované součásti,

na kterém po dopadu rychle tuhne. Během letu materiálu atmosférou může docházet k oxidaci povrchu roztavených kapek kovu. Po dopadu na substrát se vzniklé oxidické obálky stávají součástí mikrostruktury povlaku. Přítomnost těchto oxidických částic, stejně jako určitá míra pórovitosti a celkově nižší kohezní pevnost je pro povlaky tvořené technologií TWAS typická. Při vhodné volbě parametrů a materiálu povlaku umožňuje tato technologie vytvářet povlaky o tloušťce až několik nižších jednotek milimetrů.

Ačkoli mikrostruktura TWAS nástřiků nedosahuje kvalit nástřiků nanášených sofistikovanějšími technologiemi, jako jsou vysokorychlostní nebo kinetické technologie HVOF, HVOF či CS, ekonomické důvody v mnoha případech upřednostňují právě technologii TWAS. Kvalitu mikrostruktury, a s ní související vlastnosti, lze navíc významně ovlivnit správou volbou depozičních parametrů [5]. V současné době je navíc k dispozici velká škála materiálů ve formě drátů vhodných k aplikaci žárovým nástřikem, včetně vysoce pevných vysoce legovaných slitin na bázi Ni [2, 6, 7] nebo materiálů obsahujících tvrdé částice ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, jejichž ochranné schopnosti se blíží chování povlaků nanesených jinými technologiemi nástřiku [1, 3].

Nicméně, přes nepopíratelné výhody a široké uplatnění v praxi je v odborné literatuře věnována povlakům nanášeným technologií TWAS pouze malá pozornost. Cílem příspěvku je demonstrovat pozitivní vliv optimalizace nástřikových parametrů technologie TWAS a návrh kombinace materiálů povlaku vhodného jako ochrana proti korozi v prostředí vodních elektráren. Prezentované výsledky jsou součástí řešení projektu Národní centrum pro energetiku č. TN01000007.

Optimalizace depozičních parametrů nástřiku TWAS

Výsledky procesu optimalizace depozičních parametrů při nástřiku technologií TWAS jsou demonstrovány na příkladu materiálu povlaku s označením 85T od firmy Praxair Surface Technologies. Chemické složení tohoto materiálu (17,5% Cr, 12% Ni, 2,2% Mo, <0,08% C, Fe-zbytek) odpovídá nerezové oceli, kde nižší obsah uhlíku minimalizuje potenciální precipitaci karbidů v průběhu nástřiku, čímž se zvyšuje odolnost proti mezikrystalické korozi. Materiál povlaku nachází uplatnění v celé řadě aplikací v mnoha oblastech průmyslu.

Tab. 1: Parametry TWAS nástřiku materiálu 85T

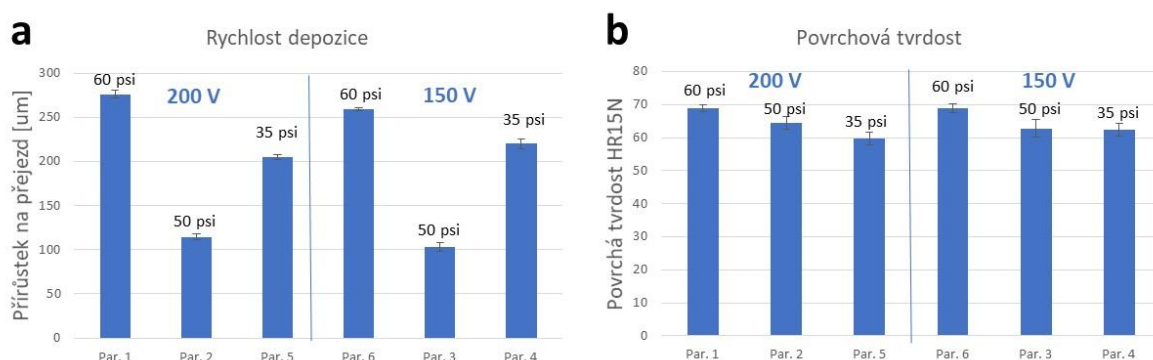
Nástřikové parametry pro materiál 85T							
		Par. 1	Par. 2	Par. 5	Par. 6	Par. 3	Par. 4
Napětí [V]		30	30	30	30	30	30
Proud [A]		200	200	200	150	150	150
Tlak vzduchu [psi]	60	50	35	60	50	35	60
	28	28	28	28	28	28	28
Depoziční vzdálenost [mm]		125	125	125	125	125	125

Nástřik byl realizován pomocí zařízení SmartArc od firmy Oerlikon Metco. Pro účely optimalizace bylo nanášeno 6 povlaků. Při nástřiku byla dodržena konstantní depoziční vzdálenost, variovány byly velikosti proudu (150 A a 200 A) a tlaku stlačeného vzduchu (rozmezí 35 psi až 60 psi). Příprava vzorků pro nástřik proběhla v souladu se standardní procedurou používanou ve společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. – vzorky byly předem tryskány Al_2O_3 se zrnitostí F22 pro dosažení požadované drsnosti povrchu a zajištění dostatečné přilnavosti k základnímu materiálu.

Vzorky byly hodnoceny z hlediska rychlosti depoziční, mikrostruktury a povrchové tvrdosti HR15N.

Rychlost depozice: Vzorky byly nastříkány s různým počtem přejezdů pro dosažení dostatečné tloušťky povlaku pro účely dalšího hodnocení. Rychlost depozice je stanovena přírůstkem povlaku na jeden přejezd. Zatímco povlak nanášený pomocí Parametrů 1 (21-080-1) vykazoval přírůstek 276 $\mu\text{m}/\text{přejezd}$, povlak nanášený pomocí Parametrů 3 (21-082-1) pouze 103 $\mu\text{m}/\text{přejezd}$. Očekávaný vyšší vliv velikosti proudu na rychlost depozice nebyl zcela potvrzen (obr. 1a). Naopak, by prokázán vyšší vliv velikosti tlaku primárního vzduchu.

Povrchová tvrdost: Měření povrchové tvrdosti bylo realizováno na zařízení Rockwell HT 8003 podle normy ČSN EN ISO 6508-1. Každá hodnota je průměrem z 8 měření. Na výsledcích měření je pozorován vliv tlaku primárního vzduchu, který je zodpovědný za vyšší rychlost dopadu částic. Vyšší kinetická energie při dopadu může mít vliv na vyšší tvrdost výsledného povlaku.

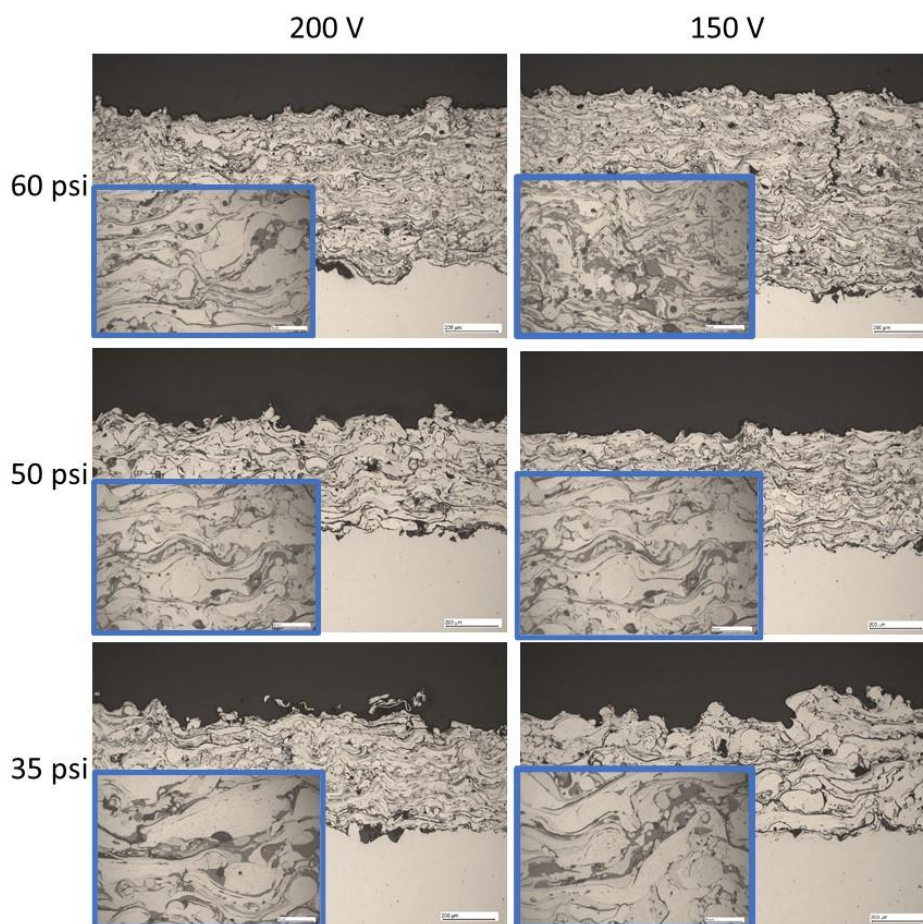


Obr. 1: Vliv depozičních parametrů TWAS nástřiku materiálu 85T na sledované charakteristiky

Vliv variace depozičních parametrů na mikrostrukturu povlaků je zdokumentován na příčných výbrusech povlaky na obr. 2. Na snímcích lze pozorovat vliv tlaku primárního vzduchu na zmenšení jednotlivých částic. Menší částice jsou zodpovědné za menší póry a celkově nižší pórovitost. To může mít pozitivní vliv na schopnost povlaku chránit podkladový materiál před působením okolního prostředí. U povlaku naneseného pomocí Parametrů 6 je patrná vertikální trhlinka, procházející, vycházející z povrchu, dosahující zhruba poloviny tloušťky povlaku. U povlaků nanesených jinými parametry nebyl výskyt trhlín zachycen.

Na základě zhodnocení mikrostruktury a rychlosti depozice byly pro další nástřik zvoleny Parametry 1.

Podobným způsobem, na základě zhodnocení povlaků nanesených z jednoho materiálu různými parametry, byly zvoleny nejvhodnější parametry pro nástřik každého materiálu povlaku. Při volbě parametrů se vycházelo z doporučení výrobce konkrétního drátu, které byly optimalizačním procesem upraveny pro potřeby konkrétního depozičního zařízení.

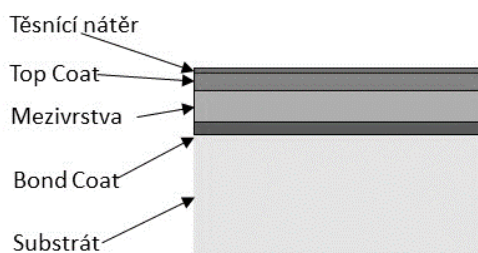


Obr. 2: Vliv depozičních parametrů TWAS nástřiku materiálu 85T na mikrostrukturu povlaku

Multivrstvé povlaky nanášené technologií TWAS

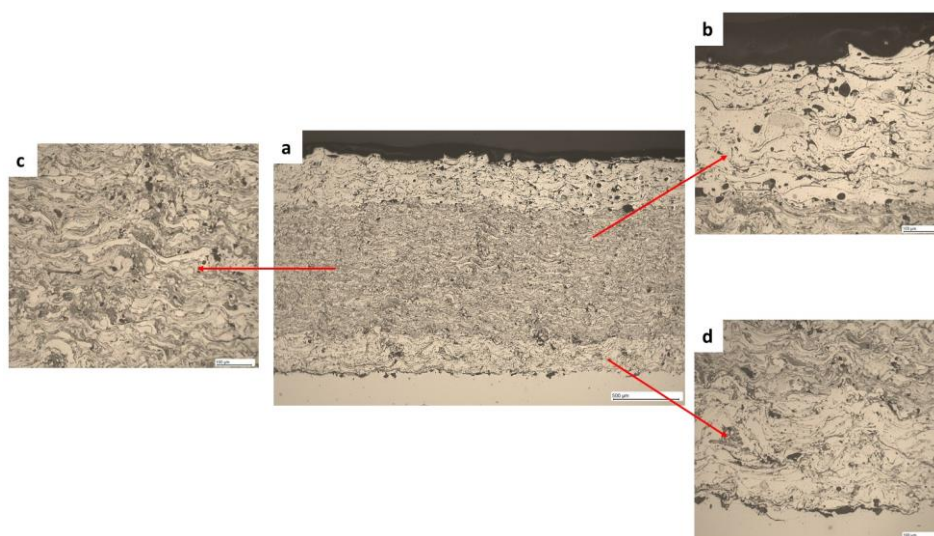
Vlastnosti povlaků nanášených z různých materiálů se navzájem liší. Tvrdé povlaky s vysokou odolností proti opotřebení nemusí být nejvhodnějším řešením pro korozně namáhaná prostředí. V případě kombinovaného namáhání, které je pro součásti pracující v náročném prostředí typické (např. kombinace korozně agresivního prostředí – eroze – vysoká teplota) je často nemožné najít materiál, který by vyhovoval všem požadavkům. V těchto případech lze zvolit řešení, sestávající se z kombinace několika vrstev s různým složením – tzv. multivrstva. Schematicky je návrh multivrstvy znázorněn na obr. 3. Na očištěný a tryskáním připravený povrch materiálu je nanášena vazná vrstva, tzv. „Bond coat“. Účelem vrstvy je zajistit dobrou přilnavost navazujících vrstev k podkladovému materiálu. Sekundární funkcí vazného povlaku je vytvořit bariéru proti průniku korozně agresivního prostředí z okolí k povrchu podkladového materiálu a zajistit ochranu proti oxidaci při vyšších pracovních teplotách. Této funkce je využíváno např. v systémech TBC (Thermal Barrier Coatings), aplikovaných na komponenty spalovacích turbín. Nejčastěji využívanými materiály pro nástřik vazebných povlaků jsou slitiny na bázi Ni (NiCr, NiAl, NiCrAlY či CoNiAlY) [4]. Úkolem navazující mezivrstvy je umožnit dosažení požadované tloušťky povlaku a zároveň přispět ke zvýšení ochranné funkce povlaku proti průniku korozního média. Pro tuto mezivrstvu byl zvolen materiál na bázi nerezové oceli. Ve srovnání s tvrdšími materiály umožňuje nástřik ve větších tloušťkách, aniž by došlo ke vzniku trhlin či delaminací. Horní vrstva multivrstvy (tzv. Top Coat) je tvořena materiálem s vysokou odolností proti opotřebení, nejčastěji s obsahem tvrdých částic. Tato funkční vrstva má za úkol zajistit prodloužení životnosti povlakované součásti, namáhané např. erozí pevnými částicemi. Pro zvýšení odolnosti systému proti průniku korozního média (např. vody

u komponent vodních elektráren) může být povrch systému zatěsněn nátěrem na bázi epoxidu, který utěsní otevřenou pórovitost povlaku v blízkosti povrchu.



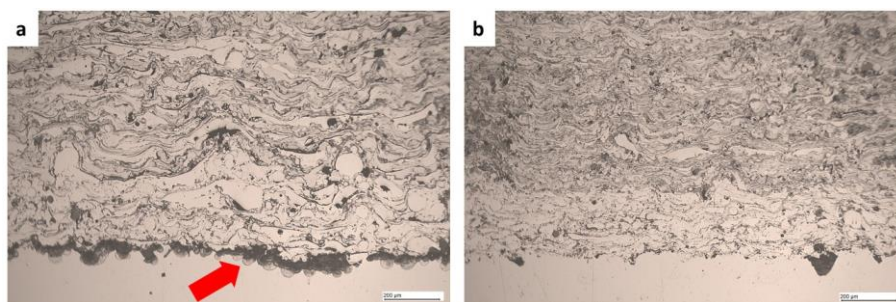
Obr. 3: Schéma multivrstvého žárově stříkaného povlaku

Příklad multivrstvého systému je uveden na obr. 4. V tomto případě byl Bond Coat tvořen materiálem Ni20%Cr, mezivrstva nerezovou ocelí s vyšším obsahem Cr a Top Coat slitinou železa s 13% Cr a 4,5% Ni, s obsahem 26% WC a 6% TiC.



Obr. 4: Multivrstvý povlak: a) řez povlakem; b) detail mikrostruktury Top Coatu, c) detail mikrostruktury mezivrstvy, d) detail mikrostruktury Bond Coatu

Multivrstvé povlaky s různým složením vazného Bond Coatu a protierozního Top Coatu byly porovnány pomocí laboratorních testů erozní odolnosti pevnými částicemi, abrazivní odolnosti pomocí Dry Sand/Rubber Wheel testu dle ASTM G-65 a korozní odolnosti v solné mlze.

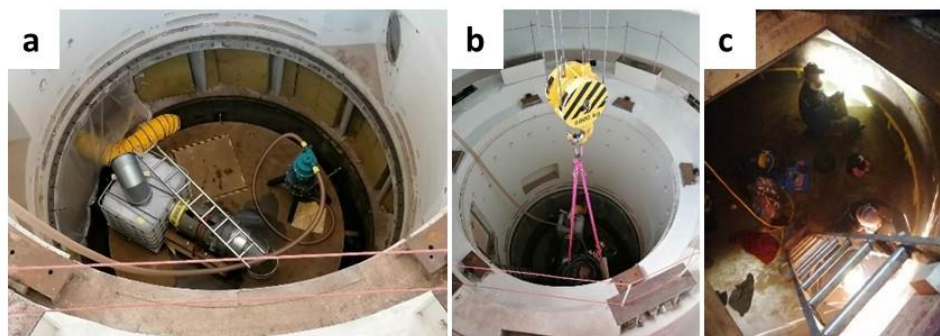


Obr. 5: Detail rozhraní mezi podkladovým materiálem a multivrstvým povlakem po korozním testu v solné mlze: a) napadení podkladového materiálu korozí; b) bez známek koroze

Závěr

Vhodným návrhem materiálu a tlouštěk jednotlivých vrstev lze přizpůsobit funkci povlaku konkrétnímu prostředí. Pro účely aplikace na komponenty vodních elektráren bylo navrženo a laboratorně testováno 6 variant multivrstvého povlaku. Jedna z kombinací byla použita pro

aplikaci na vnitřního povrch horního dílu savky TG2 na vodní elektrárně Kamýk. Multivrstvý povlak s jiným složením byl aplikován na membránové stěny výparníku v oblasti spalovací komory kotle s výrazně redukční atmosférou. Toto řešení bylo v praxi ověřeno nástřikem referenčních ploch kotle K21 ETU II. Aplikace žárových nástřiků mimo specializovaná pracoviště má však svá specifika a představuje výzvu nejen z pohledu vhodné volby technologie a kombinací materiálu, ale také z hlediska zajištění samotné realizace a udržení konstantní kvality nástřiku (obr. 6).



Obr. 6: Nástřik na vodní elektrárně Kamýk: a) utěsnění, b) závoz materiálu, c) krytování

Prezentované výsledky byly získány v průběhu řešení projektu TAČR Národní Centrum pro energetiku č. TN01000007.

Literatura

- [1] Pokhmurskii, V., Student, M., Gvozdeckii, V. et al. (2013): *Arc-Sprayed Iron-Based Coatings for Erosion-Corrosion Protection of Boiler Tubes at Elevated Temperatures*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 22, pp. 808-819. ISSN 1059-9630
- [2] Fantozzi, D., Matikainen, V., Uusitalo, M., Koivuluoto, H., Vuoristo, P. (2017): *Chlorine-induced high temperature corrosion of Inconel 625 sprayed coatings deposited with different thermal spray techniques*. Surface and Coatings Technology, Vol. 318, pp. 233-243.
- [3] Liu, C., Lu, H., Qin, E. et al. (2021): *The FeCr-Based Coating by On-Site Twin-Wire Arc Spraying for Proactive Maintenance of Power Plant Components*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 30, pp. 959-967. ISSN 1059-9630
- [4] Pawlowski, L. (2008): *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. John Wiley & Sons, Ltd., second edition, ISBN 9780471490494
- [5] Fitriyana, D.F. et al. (2020): *The Effect of Compressed Air Pressure and Stand-off Distance on the Twin Wire Arc Spray (TWAS) Coating for Pump Impeller from AISI 304 Stainless Steel*. Springer Proceedings in Physics, Vol. 242. Springer, Singapore.
- [6] Brizuela-Colmenares, N., Muñoz-Saldaña, J. (2021): *Ni-5wt% Al coatings deposited by twin wire arc spraying for molten aluminum attack protection*. *Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, May 24–28, 2021, p0700, 2021 ASM International.
- [7] Wang, J.-X., Liu, J.-S., Zhang, L.-Y., Sun, J.-F., Wang, Z.-P. (2014): *Microstructure and mechanical properties of twin-wire arc sprayed Ni-Al composite coatings on 6061-T6 aluminum alloy sheet*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 21, pp. 469-478. ISSN 1674-4799

KOROZNÍ ODOLNOST VYBRANÝCH NÁSTŘIKŮ V PROSTŘEDÍ BIOMASY

CORROSION RESISTANCE OF SELECTED COATINGS IN BIOMASS FLUE GAS

Josef Cizner, Jan Hruška a Jakub Mlnářik

SVÚM a.s., www.svum.cz

Abstrakt

V tomto článku bylo v laboratorních podmínkách v modelové atmosféře simulující spaliny z biomasy obsahující chlor a další prvky studováno několik různých povlaků na bázi niklu. Bylo porovnáno několik různých technologií metod přípravy povlaků se základním materiálem kotlových trubek – feritickou ocelí 16Mo3. K porovnání korozní a strukturní stability testovaných materiálů/povlaků při teplotách 500 °C a 600 °C bylo použito několik technik – gravimetrická analýza, SEM-EDX, WDS mikroanalýza, světelná metalografie a další. Některé z testovaných povlaků vykazovaly výrazně nižší korozní poškození než základní materiál a mohly by být dobrou možností, jak upravit stávající uhelnou elektrárnu na elektrárnu spalující biomasu.

Abstract

In this paper several different nickel-based coatings were studied in laboratory conditions in model atmosphere simulating biomass flue gas containing chlorine and other elements. A few different technologies of coating preparation methods were compared with base boiler tube material – 16Mo3 ferritic steel. Several techniques were used to compare corrosion and structural stability of tested materials/coatings at 500 °C and 600 °C – gravimetric analysis, SEM-EDX, WDS microanalysis, light metallography, and others. Some of the tested coatings showed significantly lower corrosion damage than base material and could be a good option how to modify existing coal-fired plant to biomass burning plant.

Úvod

V rámci evropské politiky byla zavedena strategie pro energetický sektor 20-20-20, která byla zaměřena na konec roku 2020. Bylo stanoveno, že se sníží nejméně 20 % emisí skleníkových plynů (ve srovnání s rokem 1990), 20 % veškeré energie vyrobené v EU bude pocházet z obnovitelných zdrojů a že se zvýší energetická účinnost o 20 % [1]. Jednou z cest, jak snížit spotřebu fosilních paliv, je výroba elektřiny a energie z obnovitelných zdrojů – v případě Česka především z biomasy. Podle údajů Eurostatu bylo v roce 2018 téměř 60 % nefosilních paliv ve formě biopaliv [2]. Předpovědi naznačují, že biomasa bude dominantní součástí mixu obnovitelných zdrojů energie i v blízké budoucnosti. Zejména díky rychlému nárůstu těžby biomasy (především dřeva) v posledních letech ve srovnání s obdobím 2011-2015. Tento nárůst činí celkem asi 50 % a je způsoben rostoucím trhem se dřevem a v některých členských státech také výskytem kůrovce [3]. Proto se v kotlích spaluje stále více biomasy spolu s dalšími alternativními druhy paliv (vylepšené recyklované palivo, odpad atd.) a vzhledem k přítomnosti velmi reaktivních prvků v tomto druhu paliva (chlór, síra) hrozí vyšší riziko korozního napadení než v případě uhlí.

Bylo provedeno několik studií o tom, jak spalování nebo spolu spalování biomasy může zvýšit korozní agresivitu spalin – zejména kvůli přítomnosti vysokého obsahu síry a chloru v surovém palivu. Vysoký obsah chlóru v biomase může mít devastující účinky na teplosměnné plochy v zařízeních spalujících slámu a v takovém prostředí nelze použít běžné materiály kotlových trubek [4]. V případě dřevní štěpky nejsou spaliny tak korozivní jako sláma nebo tráva/seno, ale přesto je míra koroze mnohem vyšší než v uhelných elektrárnách, které používají feritické/perlitické oceli do 550 °C nebo austenitické oceli v nadkritických jednotkách. To může

být problematické zejména pro elektrárny/teplárny s uhelnými kotli, které přecházejí na palivo dřevní štěpka bez větších investic nebo vylepšení materiálů přehříváků. Obecně je v tomto případě lepší použít austenitické slitiny nebo slitiny na bázi niklu, ale investiční náklady jsou vysoké. Další reálnou možností je použití návarů nebo žárových nástřiků – ty mohou výrazně zlepšit korozní odolnost běžných materiálů v prostředí s obsahem chlóru [5].

Zkoušené nástřiky, technologie nanášení, podmínky zkoušek vysokoteplotní koroze

Zkoušené nástřiky, technologie:

- matrice pro nanášení – 16Mo3 a AISI 310,
- HVOF – nástřik ve společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., slitina CoCrAlY TaCSi,
- TWAS – nástřik elektrickým obloukem ve pracovišti společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., slitina NiCrTi,
- plazma – nástřik plazmou na ÚFP AV, slitina NiCrBSi, plazmový hořák WSP-H500,
- pseudo povlak – nástřik elektrickým obloukem na pracovišti Messer Eutectic Castolin. Podkladová vrstva NiCrSi, pseudoslitina vzniká současným nanášením slitiny Cr-MoNbB a slitiny 625,
- TWAS – nástřik na pracovišti Messer Eutectic Castolin slitinou Alloy 625.

Tab. 1: Chemické složení zkoušených nástřiků

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

Podmínky zkoušení

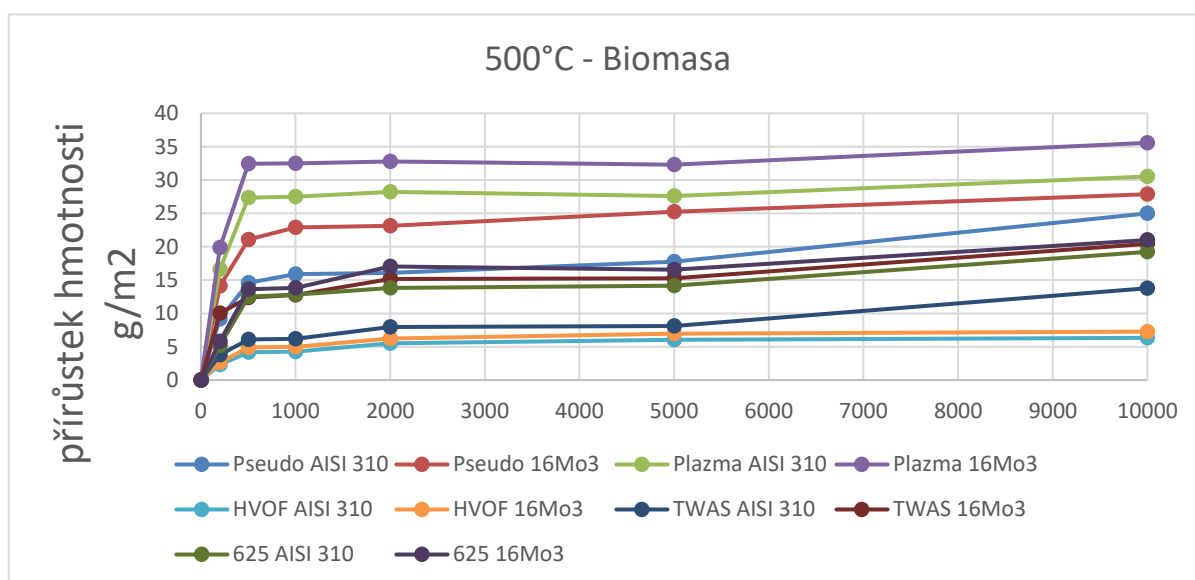
Pro zkoušení vysokoteplotní koroze byly zvoleny teploty 500 a 600 °C a modelová atmosféra spalín rostlinné biomasy (tab. 2). Zkoušky byly provedeny postupně až do 10 000 hodin. Pro laboratorní zkoušky korozní odolnosti byly pro následnou expozici v korundových lodičkách zhotoveny vzorky:

1. válečky průměru 8 x 25 mm, čela pokryta návarem slitiny Alloy 625,
2. zarovnání tloušťky čel na 1,5 mm a následné přibodování jednotlivých válečků do tyče s cca 10 válečky,
3. následný nástřik na povrch tyče a posléze rozřezání na jednotlivé vzorky.

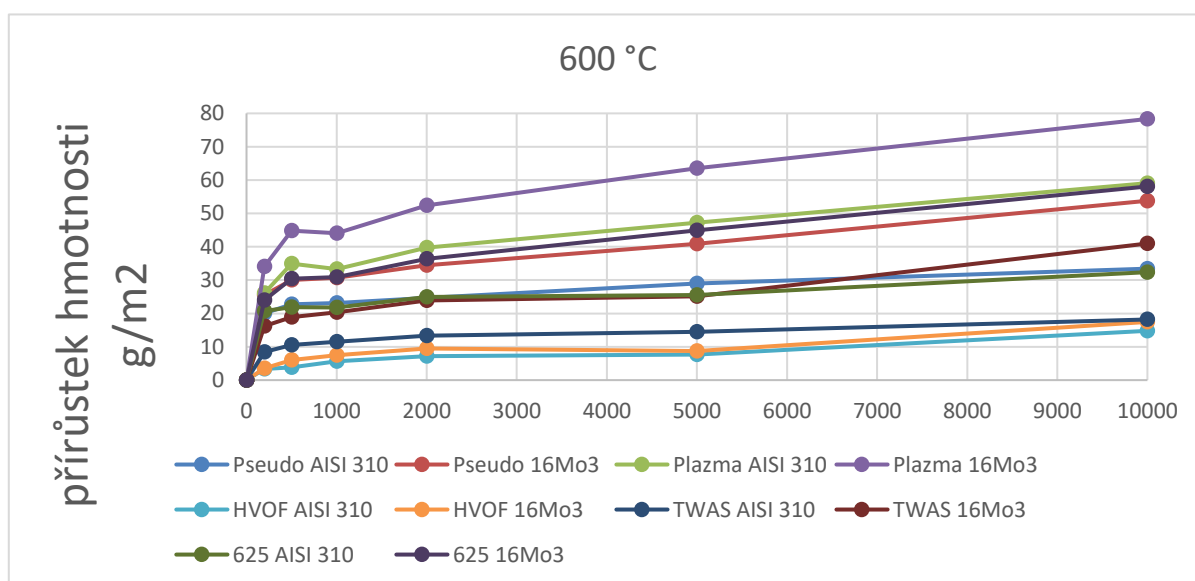
Pro každou teplotu bylo založeno 5 vzorků od každého nástřiku do plynotěsných pecí s modelovou atmosférou.

Tab. 2: Složení zkušební atmosféry

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



Obr. 7: Výsledky gravimetrie vzorků při teplotě 500 °C



Obr. 8: Výsledky gravimetrie vzorků při teplotě 600 °C

Výsledky hodnocení po tepelné expozici

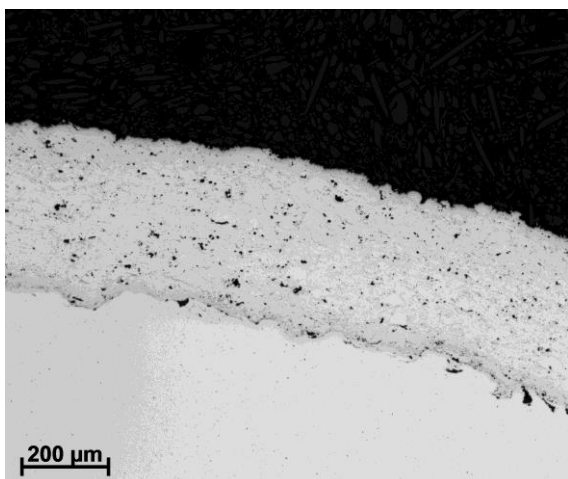
Gravimetrické hodnocení

Korozní vzorky byly po čase 500, 1000, 2000, 5000 a 10 000 hodin vyjmuty z korundových lodiček a zváženy. Grafy pro jednotlivé nástřiky, nanesené na substráty 16Mo3 a AISI 310 jsou vyneseny na obr. 1 a obr. 2. Lze pozorovat, že po počátečním nárůstu přírůstků hmotnosti až do doby zkoušení 2000 hodin je další průběh rovnoměrný a v podstatě až do 10 000 hodin velmi nízký.

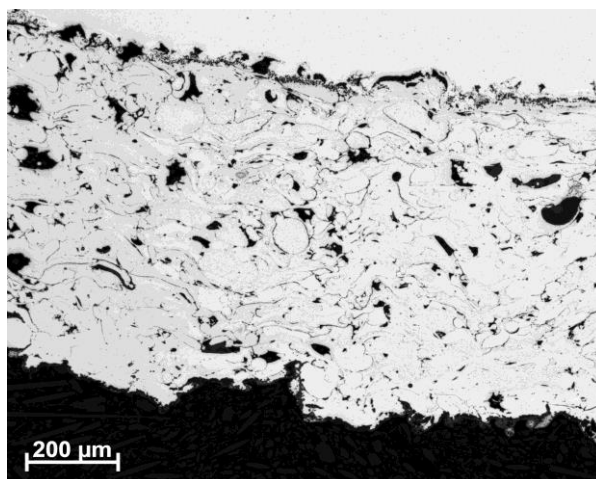
Metalografické hodnocení

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

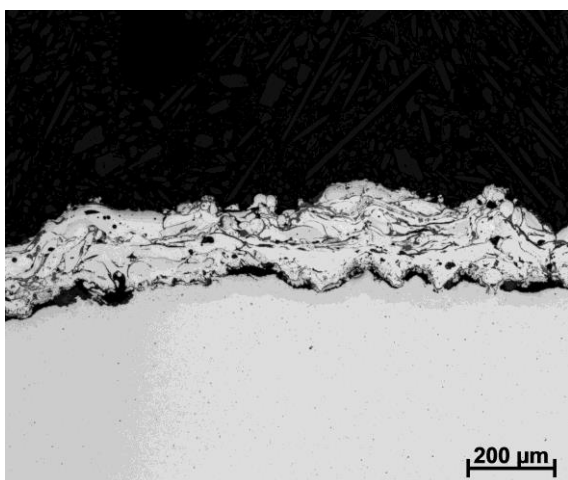
Nejkvalitněji se jeví nástřik pomocí metody HVOF (obr. 3). Nástřik je poměrně homogenní, obsahuje nízký objem pórů. Na obr. 4 je potom struktura nástřiku při použití plazmy. Zbylé tři nástřiky byly zhotoveny technologií nástřiku elektrickým obloukem. Jejich struktura s řadou oxidických plen je na obr.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



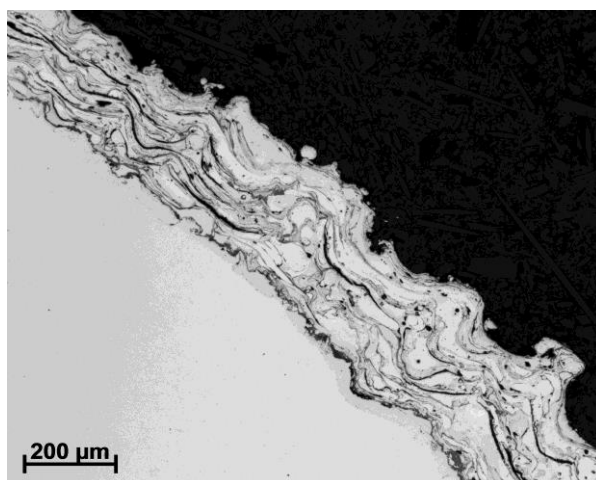
Obr. 9: Nástřik HVOF po expozici 10 000 hodin při 600 °C



Obr. 10: Plazmový nástřik po expozici 10 000 hodin při 600 °C



Obr. 11: Nástřik TWAS (pseudo) po expozici 10 000 hodin při 600 °C



Obr. 12: Nástřik TWAS (45CT) po expozici 10 000 hodin při 600 °C

Mikroanalýza

Na mikroanalyzátoru CAMEBAX s vlnově disperzními spektrometry byl provedeno měření nástřiků formou koncentračního profilu od povrchu k základnímu materiálu. Tabulky jednotlivých prvků v koncentračním profilu a následné grafy jsou pro vybrané nástřiky v tab. 3 a tab. 4 (uveden nástřik pseudo slitinou s niklovým podkladem a slitina 45CT) a na grafech – obr. 8 a obr. 9.

Tab. 3: Chemické složení povlaku z pseudo-slitiny od povrchu do základního materiálu (krok 50 μm)

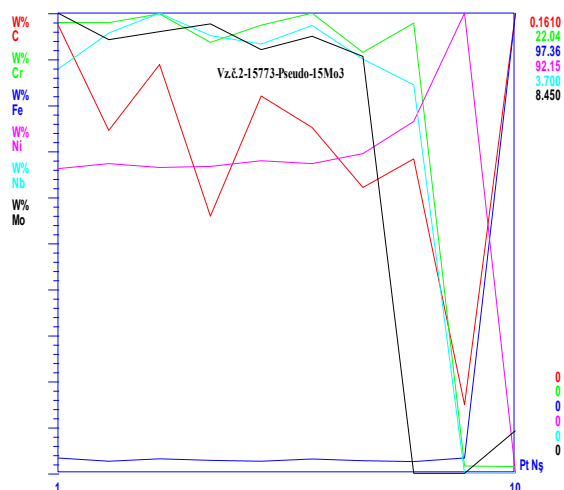
d (μm)	W%(C)	W%(Si)	W%(Ti)	W%(Cr)	W%(Mn)	W%(Fe)	W%(Ni)	W%(Nb)	W%(Mo)
50	0,157	0,374	0,426	21,587	0,365	3,254	61	3,25	8,45
100	0,12	0,43	0,349	21,58	0,314	2,564	62,014	3,54	7,963
150	0,143	0,368	0,351	22	0,252	3,09	61,24	3,7	8,11
200	0,09	0,39	0,304	20,635	0,274	2,754	61,444	3,52	8,254
250	0,132	0,324	0,374	21,458	0,305	2,56	62,587	3,451	7,78
300	0,121	0,254	0,325	22,036	0,235	3,041	62,014	3,6	8,023
350	0,1	0,31	0,34	20,158	0,311	2,666	64,025	3,33	7,654
400	0,11	0,254	0,321	21,56	0,241	2,478	70,45	3,124	0
450	0,024	0,054	0,02	0,35	0,087	3,25	92,147	0	0
500	0,161	0,124	0	0,325	0,641	97,365	0,055	0	0,784

Tab. 4: Chemické složení povlaku 45CT od povrchu do základního materiálu (krok 50 μm)

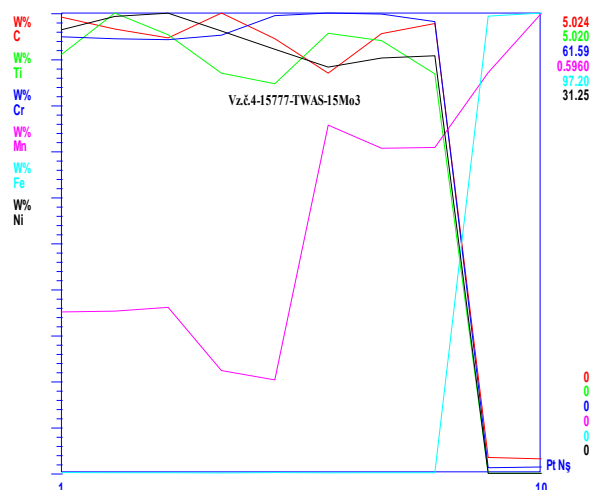
d (μm)	W%(C)	W%(Si)	W%(Ti)	W%(Cr)	W%(Mn)	W%(Fe)	W%(Ni)	W%(Nb)	W%(Mo)
50	4,98	0,18	4,57	58,42	0,21	0,16	30,11	0,00	0,00
100	4,85	0,16	5,02	58,15	0,21	0,13	31,03	0,00	0,09
150	4,75	0,18	4,78	58,02	0,22	0,13	31,25	0,00	0,00
200	5,02	0,17	4,37	58,63	0,13	0,09	30,03	0,00	0,02
250	4,75	0,17	4,25	61,25	0,12	0,15	28,80	0,00	0,02
300	4,37	0,16	4,80	61,59	0,45	0,11	27,58	0,00	0,30
350	4,80	0,20	4,72	61,45	0,42	0,13	28,20	0,00	0,03
400	4,91	0,15	4,36	60,45	0,42	0,14	28,35	0,00	0,00
450	0,17	0,37	0,00	0,75	0,52	96,58	0,00	0,00	0,00
500	0,16	0,56	0,00	0,85	0,60	97,20	0,00	0,00	0,00

Závěrečné zhodnocení

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



Obr. 13: Graf chemického složení povlaku z pseudo-slitiny po expozici při 600 °C



Obr. 14: Graf chemického složení povlaku 45CT po expozici při 600 °C

Literatura

- [1] European Commission (2020): *2020 climate & energy package*, [online]. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en
- [2] European Commission (2019): *Brief on biomass for energy in the European Union*, [online]. Available at: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109354/biomass_4_energy_brief_online_1.pdf
- [3] European Commission (2020): *Recent and abrupt increase in forest harvesting in Europe*, [online]. Available at: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/recent-abrupt-increase-forest-harvesting-europe_en
- [4] Michelsen, H.P., Frandsen, F., Dam-Johansen, K., Larsen, H. L. (1998): *Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler*. Fuel Processing Technology, Vol. 54, pp. 95-108. ISSN 0378-3820
- [5] Oksa, M., Auerkari, P., Salonen, J., Varis, T. (2014): *Nickel-based HVOF coatings promoting high temperature corrosion resistance of biomass-fired power plant boilers*. Fuel Processing Technology, Vol. 125, pp. 236-245. ISSN 0378-3820

ZLEPŠOVÁNÍ PROCESU ZASLEPOVÁNÍ TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK PAROGENERÁTORŮ JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER 440 / VVER 1000

IMPROVING THE BLINDING PROCESS OF THE HEAT EXCHANGE TUBES OF PAROGENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANTS TYPE VVER 440 / VVER 1000

Lukáš Stainer a Milan Závíška

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

S přibývajícím léty provozu našich jaderných elektráren stárne i jejich zařízení. Provoz elektráren se projevuje i na parogenerátoru a jeho teplosměnných trubkách. Teplosměnné trubky parogenerátorů tvoří fyzickou bariéru mezi primárním a sekundárním okruhem a brání tak radioaktivním produktům v průniku z jejich jaderné části do části nejaderné. Proto je enormně důležité včasné provádět vyřazení z provozu těch trubek, u kterých je zjištěna taková míra jejich porušení, která by mohla vést ke ztrátě jejich celistvosti. Jednotlivé trubky se vyřazují z provozu procesem jejich zaslepování. Z důvodu vysoké intenzity ionizujícího záření v oblasti trubek je jejich zaslepování plně automatizováno. O procesu zaslepování a jeho zlepšování v několika posledních letech pojednává tento příspěvek.

Abstract

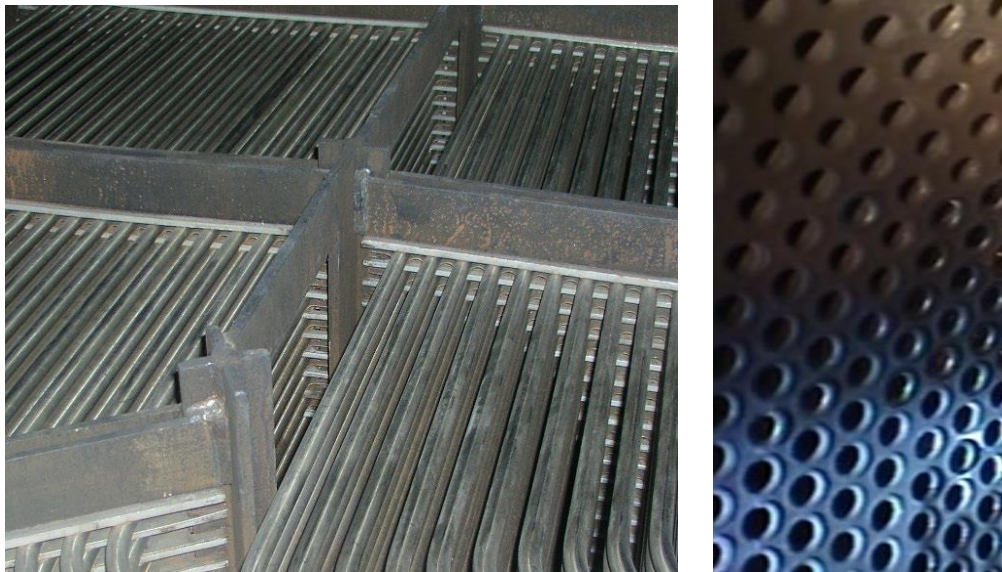
With years of operation of our nuclear power plants, their equipment will also age. The operation of power plants is also reflected in the steam generator and its heat exchange tubes. The heat exchanger tubes of steam generators form a physical barrier between the primary and secondary circuits and thus prevent radioactive products from penetrating from their nuclear part to the non-nuclear part. Therefore, it is extremely important to decommission those pipes in time that are found to have a degree of failure that could lead to a loss of integrity. The individual pipes are taken out of operation by the blinding process. Due to the high intensity of ionizing radiation in the area of the pipes, their blinding is fully automated. This paper discusses the blinding process and its improvement in the last few years.

Popis procesu zaslepování teplosměnných trubek parogenerátorů typu VVER 440/VVER 1000

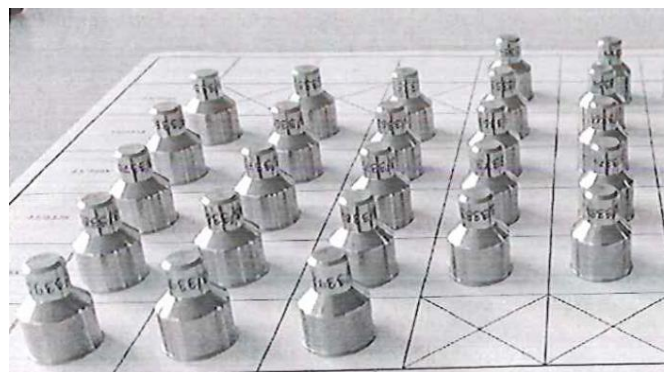
Vyřazení teplosměnné trubky parogenerátorů jaderných elektráren se provádí jejím zaslepením. Jedná se o těsné uzavření obou konců trubky pomocí speciálních kovových záslepek. Vzhledem k vysokým hodnotám ionizujícího záření je proces zaslepování trubek prováděn pomocí dálkově ovládaného manipulátoru IRIS s moduly OPZ a VIZ-HD.

Teplosměnná trubka je vyrobená z korozi-vzdorné (austenitické) oceli 08CH18N10T. Její jmenovitý vnější průměr je 16,00 mm. A jmenovitá tloušťka je 1,40 mm (viz obr. 1). Každá trubka je v parogenerátoru umístěna do tvaru „U“. Začíná v tzv. horkém kolektoru a končí v tzv. studeném kolektoru. Délky trubek jsou tak různé podle pozice trubky v trubkovém svazku.

Záslepka je vyrobena ze stejného materiálu jako teplosměnné trubky. Je u ní zaručen nízký obsah kobaltu a to maximálně 0,025 % (někdy se tak udává značení 08CH18N10T-U). Délka záslepky je 25 mm a průměr je proměnný, od 18,5 mm na jedné straně až po průměr 10,0 mm na straně druhé (viz obr. 2). Tvar záslepky byl postupně vyvinut společností VÚJE a Vítkovice.

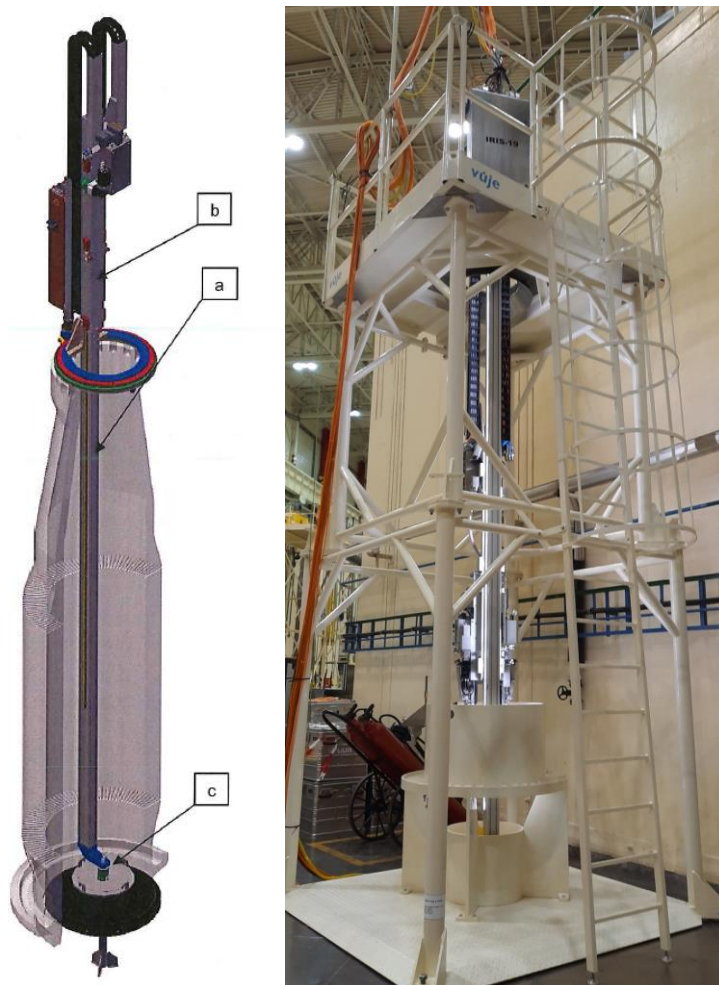


Obr. 1: Teplosměnné trubky parogenerátoru typu VVER 440 (vlevo) a pohled na trubkovnici v kolektoru (vpravo)



Obr. 2: Záslepka pro zaslepování teplosměnných trubek parogenerátorů VVER 440 / VVER 1000

Manipulátor IRIS je zařízení, které slouží k dopravě jednotlivých výměnných speciálních modulů do a z kolektoru parogenerátoru. Hlavní část manipulátoru tvoří nosný excentrický sloup vyrobený z hliníkových profilů. Sloup je z jedné strany zakončen zátkou a na druhé straně motory, které zajišťují požadované pohyby a veškerou potřebnou elektronikou (viz obr. 3). Na sloupu je vytvořena vodící dráha, po které jezdí výměnné moduly.



Obr. 3: Manipulátor systému IRIS (a – excentrický sloup, b – pohony a elektronika, c – centrovací a těsnící zátka)

Modul OPZ a modul VIZ-HD. Modul OPZ umožňuje sušení trubek, jejich odvrtání, nasazení záslepek a provedení těsnících svarů záslepek. Modul VIZ-HD je pak používán k provedení finální vizuální kontroly těsnících svarů záslepek.

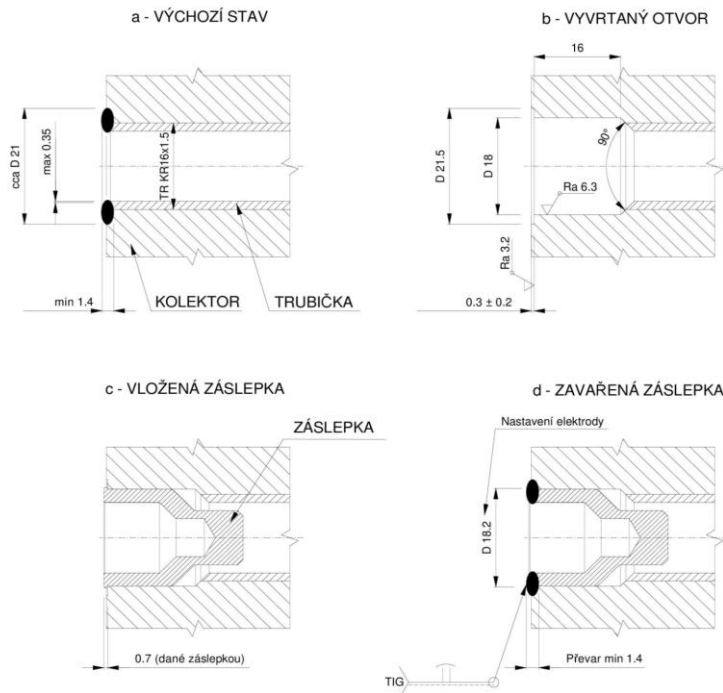
Proces zaslepení teplosměnné trubky je rozdělen do několika postupných technologických operací (viz obr. 4). Jedná se o:

- vysušení trubky určené k zaslepení,
- odvrtání výrobního těsnícího svaru trubky,
- nasazení záslepky do odvrtného otvoru,
- svaření nového těsnícího svaru záslepky.

V případě zaslepování několika trubek se každá operace provádí vždy postupně pro všechny trubky.

Problémy procesu zaslepování teplosměnných trubek v posledních několika letech

Proces zaslepování teplosměnných trubek byl vyvinut již před uvedením parogenerátorů do provozu. V počátku se jednalo o ruční způsob, kdy byl do kolektoru spuštěn pracovník, který provedl všechny technologické operace. Vzhledem k vysokým hodnotám ionizujícího záření byl pak celý proces zaslepování kompletně automatizován.



pozn.: průměry, hloubky vrtaných otvorů a drsnosti jsou dány vrtacím nástrojem

Obr. 4: Proces zaslepování teplosměnných trubek parogenerátorů

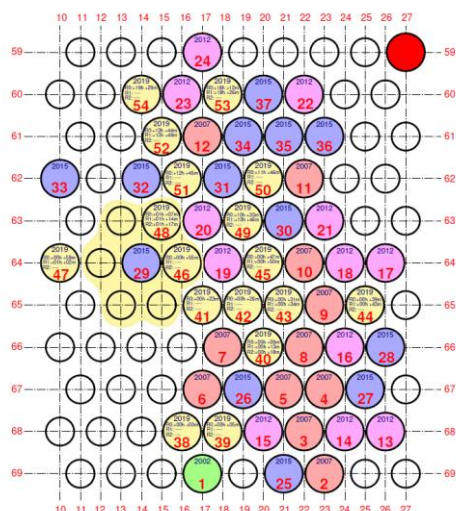
V prvních letech provozu parogenerátorů byl počet zaslepovaných trubek minimální. Proces zaslepování se tak jevil jako optimální. Pokud se už zaslepoval větší počet trubek, tak byly v různých částech kolektoru. Těsnící svary záslepek byly kvalitní na první průchod a nebylo potřeba jejich oprav druhým nebo dokonce třetím průchodem.

Postupně však začalo u některých parogenerátorů docházet k nárůstu počtu zaslepovaných trubek. Navíc tendence provozního poškození teplosměnných trubek se častěji koncentruje v jednom místě trubkového svazku. Důsledkem je, že trubky určené k zaslepení se nacházejí těsně u sebe, resp. tvoří poměrně ucelené hnízdo. Uvedená skutečnost odhalila v několika posledních letech nedostatky a problémy procesu zaslepování.

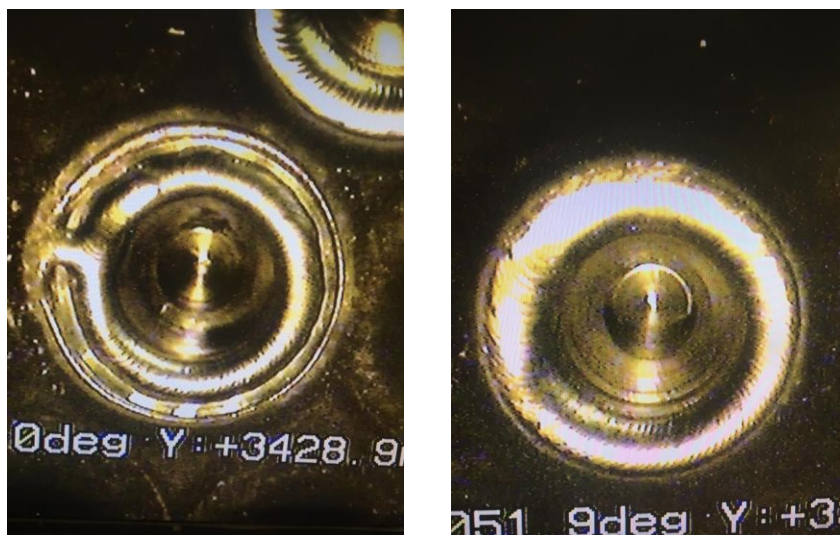
Jednalo se zejména o dva problémy:

- porušení těsnícího svaru záslečky při svařování těsnícího svaru sousední záslečky,
- „úzké“ provedení těsnícího svaru záslečky při hlubším odvrtání zaslepované teplosměnné trubky.

V prvním případě bylo zaslepování prováděno v místech, kde bylo z dřívější doby již zaslepeno téměř 50 trubek (viz obr. 5). Nové těsnící svarové spoje neměly při prvním průchodu požadovanou kvalitu a bylo tak potřeba provádět druhý někdy i třetí průchod. V důsledku toho docházelo k čím dál většímu vnášení tepelné energie do základního materiálu přechodových můstků mezi jednotlivými zaslepovanými trubkami. To v konečném důsledku vedlo ke vzniku netěsností základního materiálu můstků ve formě trhlin v okolí jedné dříve umístěné záslečky. Při zaslepování těsně sousedící teplosměnné trubky došlo k teplenému odpaření vody, která zůstala pod dříve zaslepenou trubkou. Vzniklý tlak porušil místo spoje těsnícího svaru s přechodovým můstkem. A tím se dané místo stalo netěsné. Ideální by bylo, pokud by se původní záslečka jen vyměnila za novou. Ale v důsledku existence porušení několika můstků v jejím okolí musela být provedena náročná oprava, která zahrнула i všechny okolní záslečky.



Obr. 5: Schéma zaslepených trubek v jednom uceleném hnždě



Obr. 6: „Úzký“ těsnící svar záslepky při větším zahloubení vrtaného otvoru (vlevo) a předpisový těsnící svar záslepky (vpravo)

Ve druhém případě se jednalo opět o zaslepování několika sousedících trubek. Operátor svařování musí při po odvrtání původního svaru teplosměnné trubky provést ještě vytvoření rovné plochy pro umístění záslepky. Aby rovnou plochu vytvořil, musel v důsledku nerovnoměrného okolního povrchu, odvrát větší objem materiálu. Dostatečně rovná plocha se mu podařila vytvořit ve větší hloubce, než bylo běžné. Vzniklý těsnící svarový spoj záslepky tak neměl typickou šířku a tím zřejmě ani dostatečný průvar, předepsaný procesem svařování (viz obr. 6). Oprava byla provedena odvrtáním již zavařených záslepek s „úzkým“ provedením těsnících svarových spojů a jejich náhradou novými záslepkami.

Zlepšování procesu zaslepování teplosměnných trubek

Na základě zkušeností uvedených v kapitole 2 vytvořil provozovatel jaderných elektráren expertní tým pro zlepšování procesu zaslepování. Expertní tým byl tvořen pracovníky ČEZ a. s., ŠKODA JS a. s. (realizátor zaslepování), VÚJE a. s. (výrobce manipulátoru) a Vítkovice (výrobce parogenerátorů).

Výsledkem skoro dvouleté práce expertního týmu byla řada opatření, které se promítli jak do samotného procesu zaslepování, tak i do organizace a výcviku pracovníků, kteří zaslepování teplosměnných trubek provádějí. Práce expertního týmu byla také provázena řadou výpočtů, analýz a experimentů.

Z hlediska prvního typu problému, který je uveden v kapitole 2 příspěvku, byly především provedeny výpočty a modely teplotního ovlivnění základního materiálu můstků v přímém i vzdáleném okolí zaslepované teplosměnné trubky.

Bylo prokázáno, že vnos tepla už při jednom průchodu svařovací elektrody kolem záslepky má značný vliv na pevnost základního materiálu můstků. V případě, že je můstek ovlivněn už čtyřmi nebo více průchody je vznik trhlin vysoce pravděpodobný. K tomuto případu tak stačí, když jsou vedle sebe dvě zaslepované trubky a v obou případech se provádí oprava druhým průchodem.

Na základě této zjištěných skutečností byly přijaty opatření:

- Speciální technická skupina odstávky určuje přesné pořadí zaslepování teplosměnných trubek s ohledem na počet tepelného ovlivnění základního materiálu můstků.
- Byl upraven postup pro hodnocení kvality prováděných těsnících svarových spojů, tak aby byl minimalizován počet oprav těsnících svarů druhým nebo třetím průchodem.
- Byla stanovena prodleva mezi svařováním jednotlivých těsnících svarů záslepek na to 30 minut.
- Po zaslepování je vždy prováděn výpočet tepelného ovlivnění každého přechodového můstku s tím, že při jeho nadlimitním ovlivnění jsou prováděny další speciální nedestruktivní kontroly zaměřené na zjištění vzniku případných trhlin.

Z hlediska druhého typu problému, který je uveden v kapitole 2 příspěvku, byla především provedena řada experimentů. Experimenty byly zaměřené zejména na zjištění vlivu hloubky zahloubení otvoru pro osazení novou záslepkou a vlivu vzdálenosti elektrody od hrany záslepky. Závěrem těchto experimentů je [1]:

- Kvalita těsnících svarů záslepek je výrazně ovlivněna hloubkou zahloubení vrtaného otvoru. V tomto případě existuje mezní hodnota zahloubení 0,5 mm. Při překročení této hodnoty už dochází k nespojení roztaveného materiálu záslepky a hrany otvoru po obvodě svarového spoje.
- Vzdálenosti elektrody od hrany záslepky v rozmezí hodnot 1,5 mm až 1,8 mm pro při hloubce zahloubení otvoru max. 0,5 mm je optimální.
- Pomocí tlakových zkoušek byla prokázána pevnost všech těsnících svarových spojů záslepek, a to jak při tlačení záslepky směrem do trubky (tlakové podmínky primárního okruhu), tak i v opačném směru, tedy směrem z trubky.
- Pokles teploty těsnícího svarového spoje záslepky po jeho svaření je velice rychlý. Teplota nižší než 100 °C je dosažena do 2 minut.

Na základě této zjištěných skutečností byla přijata opatření:

- Byl vytvořen postup měření hodnoty zahloubení a přijata opatření pro případ, že by mělo zahloubení větší hloubku než 0,5 mm.
- Bylo zahájeno provádění ověřovacího svarového spoje na speciálním stendu (mimo kolektor) před každým zaslepováním. I když je tento ověřovací spoj prováděn v prostoru, kam má obslužný personál přístup, tak jsou všechny technologické operace provedeny i tak automatizovaně, tedy zcela totožně jako v kolektoru parogenerátoru.
- Byl zaveden systém častějšího ověřování zařízení a schopností personálu pro zaslepování teplosměnných trubek. Dříve to bylo prováděno pouze v rámci Kontrolních svarových spojů, tj. jednou za 12 měsíců. Nově je prováděno ověřování každé dva měsíce.

Literatura

- [1] Záváška, M., Matějka, J., Vnouček, M., Jandík, V. (2020): *Zlepšení účinnosti zaslepování TS trubek PG*. Zpráva, ŠKODA JS a.s., Plzeň.

ZÁVĚREČNÉ VÝSTUPY PROJEKTU TH02020565 PRO STANOVENÍ VHODNÝCH PARAMETRŮ PRO OBNOVU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORŮ TYPU VVER 440 METODOU REGENERAČNÍHO ŽÍHÁNÍ

FINAL OUTPUTS OF THE TH02020565 PROJECT FOR DETERMINATION OF SUITABLE PARAMETERS FOR RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF WVER 440 REACTOR INTERNALS MATERIALS BY THERMAL ANNEALING METHOD

Ivana Schnablová ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Ondřej Buršík ^{a)}, Kateřina Rusňáková ^{a)} a Aleš Materna ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

V návaznosti na současný trend prodloužování životnosti průmyslových komponent jsou kromě inovativních zkušebních metod pro stanovení mechanických vlastností průběžně vyvíjeny a modifikovány další metody, jejichž aplikace na konstrukční materiály může mít znatelný přínos v procesu prodloužení životnosti provozovaných zařízení. Jednou z prověřených metod pro obnovení původních mechanických vlastností konstrukčních materiálů je i regenerační žíhání, které bylo v minulosti úspěšně aplikováno na vybrané tlakové nádoby reaktorů typu VVER 440. Pro materiály vnitřních částí reaktorů však analogický postup využit doposud nebyl. Materiály vnitřních částí reaktorů nejsou monitorovány programy svědečných těles, jako je tomu v případě tlakových nádob reaktorů, a stupeň jejich degradace se tak odhaduje převážně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře, nebo výpočetních postupů a norem. Předmětem příspěvku je ucelená prezentace vhodných parametrů regeneračního žíhání pro aplikaci na ozářené materiály vnitřních částí reaktoru VVER 440 k obnovení výchozích mechanických vlastností.

Abstract

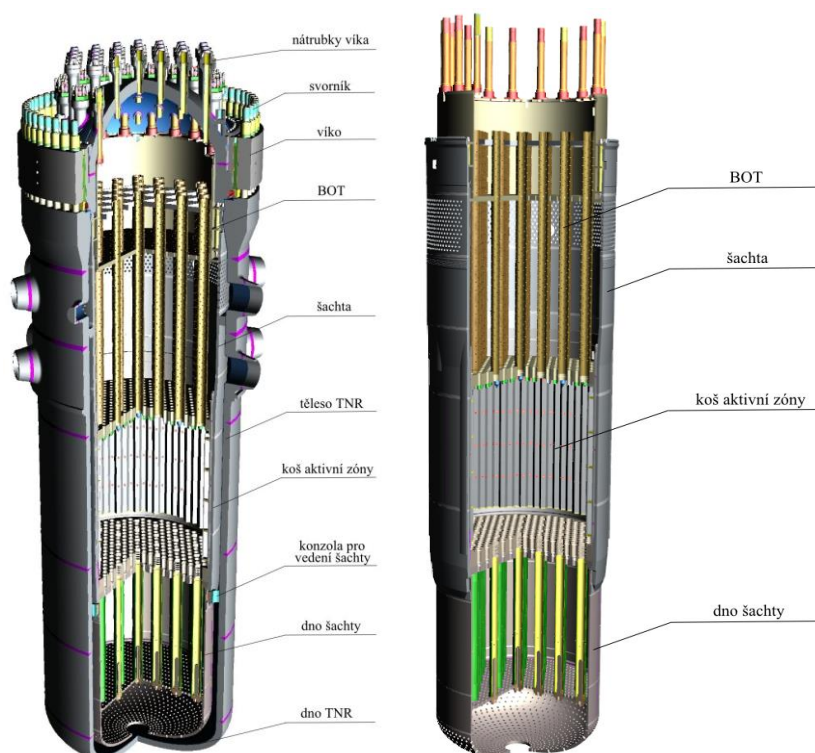
Within the current trend of industrial components life extension, in addition to innovative test methods for the mechanical properties determination, other methods are continuously developed and implemented. Their application to structural materials can have a significant benefits in the process of extending the life of equipment. One of the possible solutions for the initial mechanical properties of structural materials re-establishment is thermal annealing, which has been successfully applied on WVER 440 type reactor pressure vessels (RPV). The RPV internals are not monitored by surveillance programs and the degree of internals material degradation is usually based on literature data from tests on similar materials, from predictive formulae or other procedures and normative documents. The paper is focused on the comprehensive presentation of suitable recovery annealing parameters for application to irradiated materials of internal components of the WVER 440 type reactor for the re-establishment of initial mechanical properties.

Úvod

Hlavní funkce vnitřních částí reaktoru (VČR) sestávají z geometrického uspořádání palivových kazet v oblasti aktivní zóny (AZ), vymezení pohybu palivových kazet a regulačních tyčí a usměrnění toku chladiva kolem palivových kazet. VČR jsou z provozního hlediska důležitým prvkem tepelného a radiačního stínění tlakové nádoby reaktoru (TNR). Vnitřní části reaktoru jsou komponenty tzv. vnitřní vestavby uvnitř tlakové nádoby reaktoru. U reaktorů typu VVER

se jedná o komponenty (obr. 1): šachta (nosný válec), dno šachty, koš aktivní zóny (KAZ), blok ochranných trub (BOT) [1].

Regenerační žihání je metoda dosud aplikovaná pouze na tlakové nádoby reaktorů typu VVER 440 s cílem prodloužení jejich životnosti. Výsledky získané v rámci realizace projektu TH02020565 „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ (2017–2020) je možné považovat za základ pro přímou aplikaci na materiály vnitřních částí reaktorů typu VVER pro případné prodloužení životnosti. Na základě výsledků dosažených v rozsáhlém experimentálním programu řešeného projektu byl stanoven optimální režim pro regenerační žihání vnitřních částí reaktoru VVER 440 a zvolený postup byl následně certifikován [1]. Navržený program sestávající z mechanických zkoušek prováděných na ozářených i neozářených zkušebních tělesech před a po žihání umožnil stanovit vliv jednotlivých žihacích režimů na konstrukční materiály VČR v různém stupni ozáření.



Obr. 1: Konstrukční uspořádání TNR a VČR reaktoru typu VVER 440 [2]

Experimentální materiál

Pro potřeby experimentálního programu byly k výrobě zkušebních těles využity části archivního materiálu, které byly odebrány z dříve provozovaných vnitřních částí reaktoru JE Greifswald. Jednotlivá zkušební tělesa byla vyrobena ze segmentu nosného válce, pláště koše AZ a hraněného plechu. Chemické složení experimentálního ozářeného materiálu i výsledná radiační dávka jsou uvedeny v tab. 1 a v tab. 2.

Experimenty a diskuse výsledků

Pro praktické ověření zvoleného postupu obnovy mechanických vlastností prostřednictvím regeneračního žihání byly využity zkoušky tvrdosti (dle ČSN EN ISO 6507-3 [3]) a zkoušky statické lomové houževnatosti (dle ASTM E1820 [4]). Za účelem stanovení citlivosti materiálů VČR ke vzniku a rozvoji trhlin EAC a IASCC v prostředí primárního okruhu byly provedeny zkoušky pomalou rychlostí deformace (SSRT). Jelikož se jedná o unikátní ozářený materiál 08Ch18N10T přímo z VČR jaderné elektrárny Greifswald, kterého je velmi omezené množství, bylo pro zkoušku statické lomové houževnatosti přistoupeno k výrobě miniaturizovaných zkušebních těles pro excentrický tah – typ mCT (10 x 10 x 4 mm). Na zkušebních tělesech tohoto

typu je možné provádět i měření tvrdosti HV 5 před a po regeneračním žihání, čehož bylo využito pro získání doplňkových dat popisujících odezvu ozářeného materiálu na aplikované regenerační žihání o různých parametrech.

Vliv žihání na tvrdost materiálu

Z výsledků měření provedených před a po žihání je patrný pozitivní vliv provedeného žihání. Tvrdost u ozářených těles je na počátku vyšší a po vyžihání dochází k jejímu snížení, a to až téměř na původní hodnoty typické pro neozářený materiál. Z obr. 2 je zřejmé, že žihání při teplotě 600 °C má na tvrdost obecně pozitivnější vliv než žihání při teplotě 550 °C. Stejně tak i doba výdrže 1 hodina na žihací teplotě nemá takový vliv jako žihání po dobu 4 a 6 hodin.

Vliv žihání na lomovou houževnatost

Výsledky ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na normalizované plastické deformaci jsou uvedeny na obr. 3 a obr. 4. V grafech jsou uvedeny výsledky zkušebních těles žihaných po identickou dobu a jejich porovnání s neozářeným a ozářeným stavem materiálu. Průměrné hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ jsou pro jednotlivé stavy materiálu pláště KAZ, nosného válce a hraněného plechu porovnány v tab. 3 a graficky znázorněny na obr. 5 a obr. 6. Podrobnou analýzou výsledků mechanických vlastností bylo potvrzeno, že regeneračním žiháním při teplotě 600 °C s výdrží 6 hodin dochází k nejpříznivější úrovni zotavení mechanických vlastností, odpovídající trendu zjištěnému na materiálech s nižším ozářením.

Závěr

Výsledky zkoušek mechanických vlastností prokázaly, že nejpříznivější obnovy mechanických vlastností bylo dosaženo u režimu žihání, při kterém je ozářený materiál žihán na vzduchu při teplotě 600 °C po dobu 6 hodin (s rychlostí ohřevu 10 °C za minutu). Tento režim žihání byl aplikován na zkušební tělesa vyrobená ze segmentů odebraných z komponent VČR, které jsou nejvíce vystavené ionizujícímu záření při provozu jaderného reaktoru. Konkrétně se jednalo o segmenty odebrané z nosného válce, pláště KAZ a hraněného plechu. Aplikace zvoleného optimálního režimu žihání na ozářeného materiálu reálných komponent VČR vyjmutých z vyřazeného reaktoru JE Greifswald vedla k obnově mechanických vlastností ozářením poškozeného materiálu, jak je uvedeno v tab. 4 a v tab. 5. Výsledky provedených mechanických zkoušek prokázaly pozitivní vliv provedeného regeneračního žihání jak při teplotě +24 °C, tak i při teplotě +310 °C, která odpovídá provozní teplotě vybraných komponent VČR.

Za účelem stanovení citlivosti vybraných experimentálních materiálů VČR ke vzniku a rozvoji trhliny EAC a IASCC v prostředí primárního okruhu reaktoru VVER – 440 za provozní teploty +310 °C, byly provedeny zkoušky pomalou rychlostí deformace na zkušebních tělesech typu SSRT. Při těchto zkouškách bylo prokázáno, že pro zvolený režim žihání nedochází ke zvýšení citlivosti ke koroznímu praskání v podmínkách chladiwa primárního okruhu. Výsledky těchto zkoušek a porovnání průběhu deformačních křivek prokázaly vhodnost tohoto režimu regeneračního žihání (obr. 7, obr. 8 a tab. 6). Výstupy realizovaného projektu poskytují základ pro případnou implementaci do průmyslové praxe a prodloužení provozní životnosti vnitřních částí reaktorů typu VVER 440 a tím i životnosti celého reaktoru v rámci dlouhodobé udržitelnosti energetiky.

Literatura

- [1] Schnablová, I. (2021): *TH02020565 – Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren*. Certifikovaná metodika, DITI 2303/232, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.
- [2] Sýkora, O. (2013): *Model Reaktoru VVER 440/213-Č*. Zpráva, DITI 2304/87, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.

[3] ČSN (2006): *EN ISO 6507-1, Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Technická norma, Český normalizační institut, Praha.

[4] ASTM (2020): *Standard ASTM E1820, Standard Test Method Measurement of Fracture Toughness*. Standard, ASTM E1820, ASTM International, West Conshohocken (PA).

Tab. 1: Výsledná radiační dávka pro zvolený ozářený materiál 08Ch18N10T

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. 2: Výsledná radiační dávka pro zvolený ozářený materiál 08Ch18N10T

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

Tab. 3: Průměrné hodnoty $J_{0,2}$ pro jednotlivé stavy a režimy regeneračního žíhání materiálu nosného válce, pláště KAZ a hraněného plechu

Stav materiálu	Komponenta / Materiál	Ozáření [dpa]	T=+24 °C		T=+310 °C	
			$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]	$J_{0,2}$ [kJ·m ⁻²]
Neozářeno	-	-	283,7	0	202,8	0
Ozářeno	Nosný válec AGS I	2,4	179,6	-104,1	89,4	-113,4
Žíháno: 600 °C / 4 hod.			182,6	-101,1	165,5	-37,3
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			200,1	-89,6	187,1	-15,7
Ozářeno	Plášť KAZ AGS II	5,2	92,7	-191,0	61,4	-141,4
Žíháno: 600 °C / 4 hod.			289,1	+5,4	154,6	-48,2
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			291,7	+8,0	186,4	-16,4
Ozářeno	Hraněný plech AGS II	11,4	89,9	-193,8	32,5	-170,3
Žíháno: 600 °C / 6 hod.			244,6	-39,1	155,3	-47,5

Tab. 4: Hodnocení míry obnovy $J_{0,2}$ zvoleného režimu regeneračního žíhání při teplotě zkoušky +24 °C

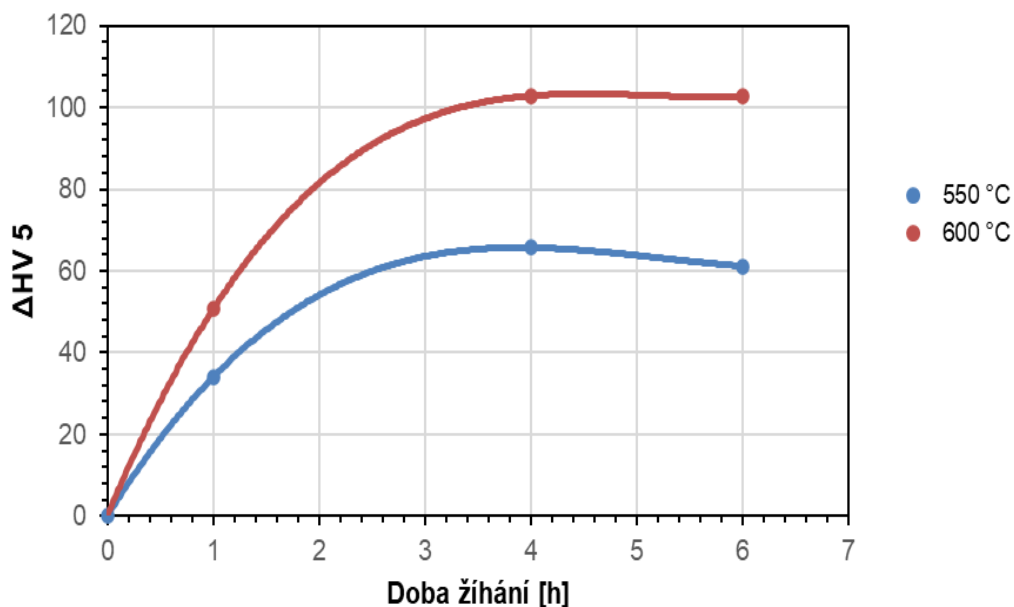
Komponenta VČR (teplota okolí +24 °C)	Podíl zotavení $J_{0,2}$	
		Nosný válec
Finální žíhací režim (600 °C/6 hod/vzduch)	Koš aktivní zóny	100 %
	Hraněný plech	86,2 %

Tab. 5: Hodnocení míry obnovy $J_{0,2}$ zvoleného režimu regeneračního žíhání při teplotě zkoušky +310 °C

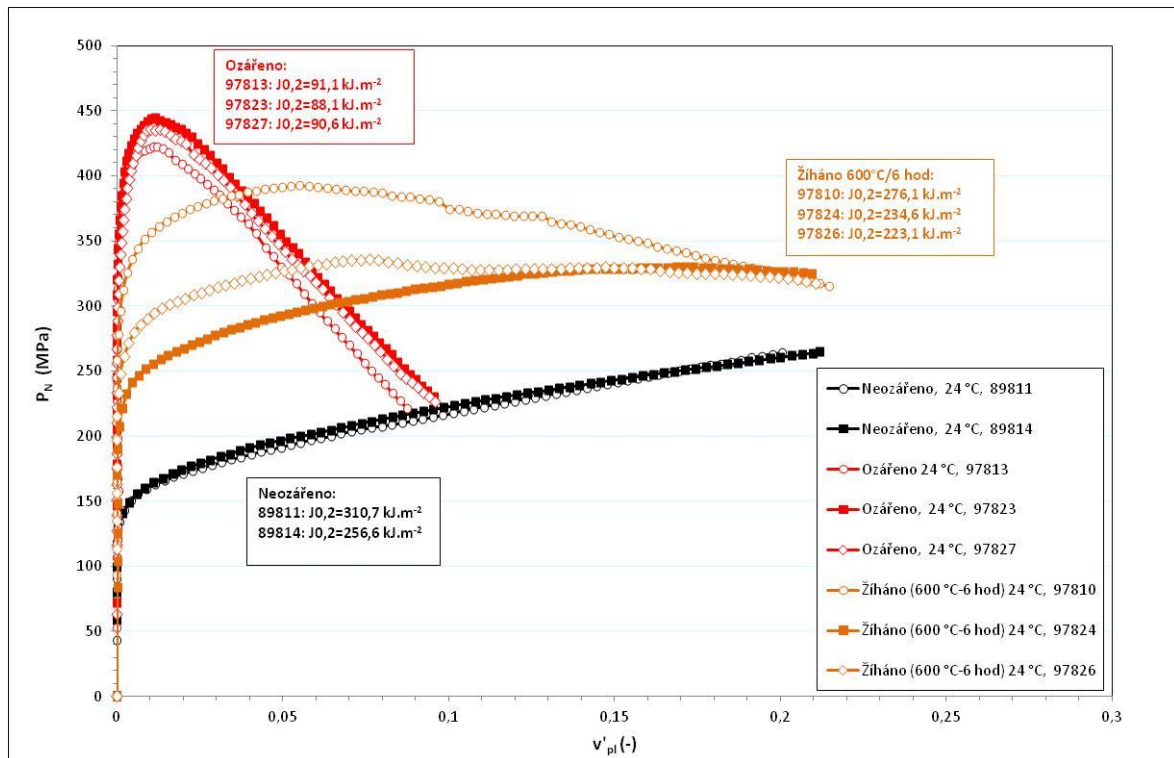
Komponenta VČR (teplota okolí +310 °C)		Podíl zotavení $J_{0,2}$
		Nosný válec
Finální žíhací režim (600 °C/6 hod/vzduch)	Koš aktivní zóny	91,9 %
	Hraněný plech	76,6 %

Tab. 6: Porovnání výsledků zkoušek SSRT pro vybrané stavy materiálů VČR v prostředí primárního okruhu VVER, +310 °C

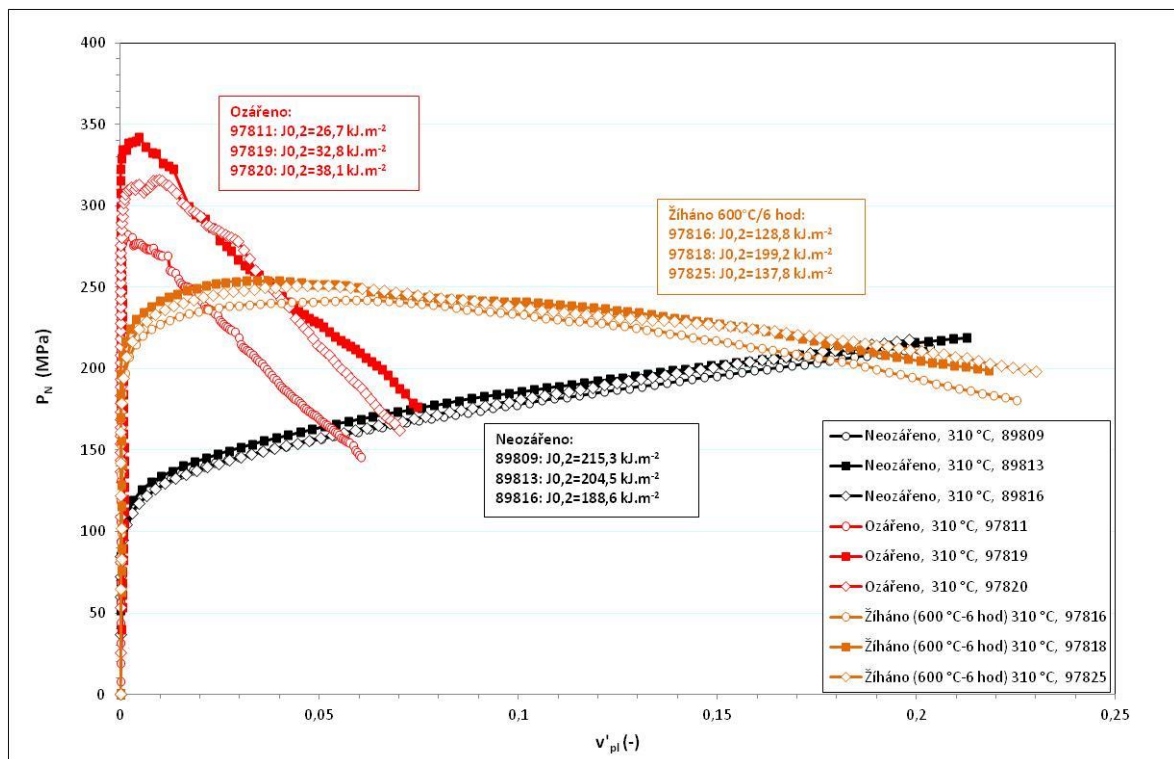
Materiál	Označení ZT	Stav	Rychlost deformace	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Plášť KAZ	8TA_157	neozářený	$7 \times 10^{-7} s^{-1}$	156	402	26	70
	8TA_159	5,2 dpa nežíhaný	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$	762	767	8.4	56
	8TA_160	5,2 dpa žíhaný 600 °C/4 hod	$1 \times 10^{-7} s^{-1}$	443	378	min. 36	min. 50
	8TA_161	5,2 dpa žíhaný 600 °C/6 hod	$3 \times 10^{-7} s^{-1}$	421	326	min. 36	min. 50
Hraněný plech	8TA_158	Neozářený	$7 \times 10^{-7} s^{-1}$	90	462	32	39
	8TA_163	11,4 dpa nežíhaný	$2 \times 10^{-7} s^{-1}$	784	792	22	58
	8TA_164	11,4 dpa žíhaný 600 °C/ 6 hod	$3 \times 10^{-7} s^{-1}$	490	372	min. 36	min. 50



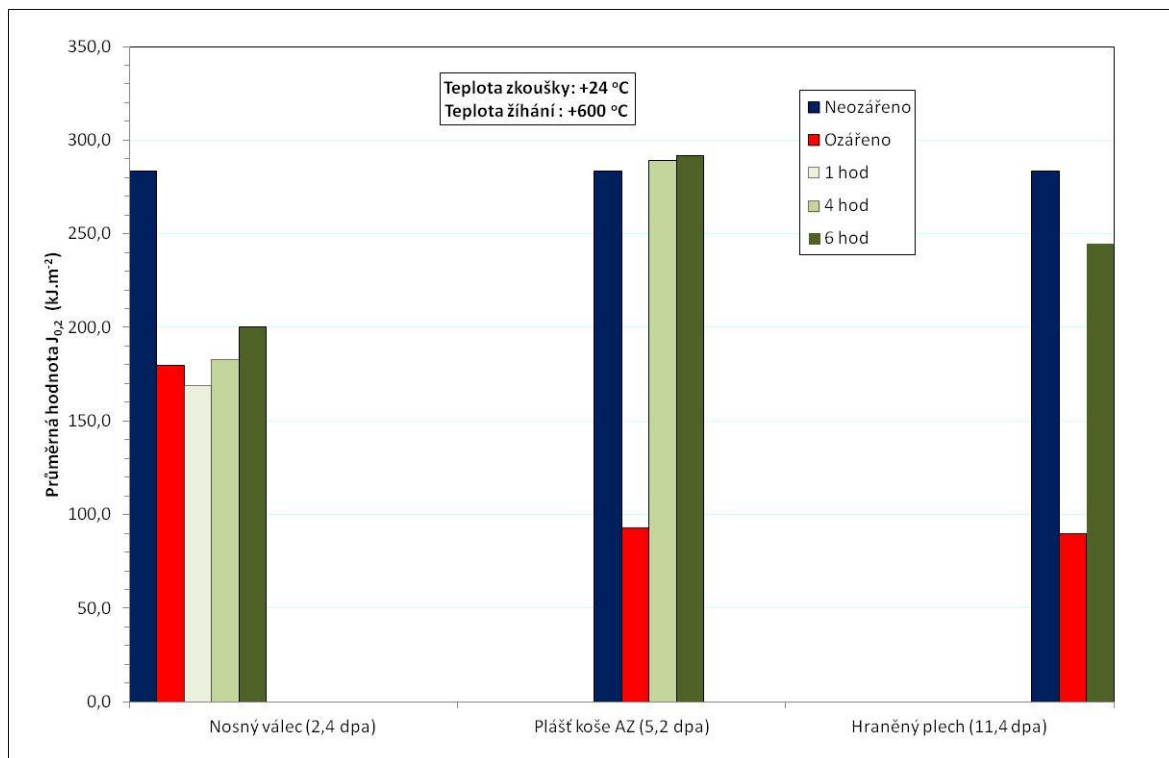
Obr. 2: Závislost změny tvrdosti před a po žíhání na zvoleném žíhacím režimu



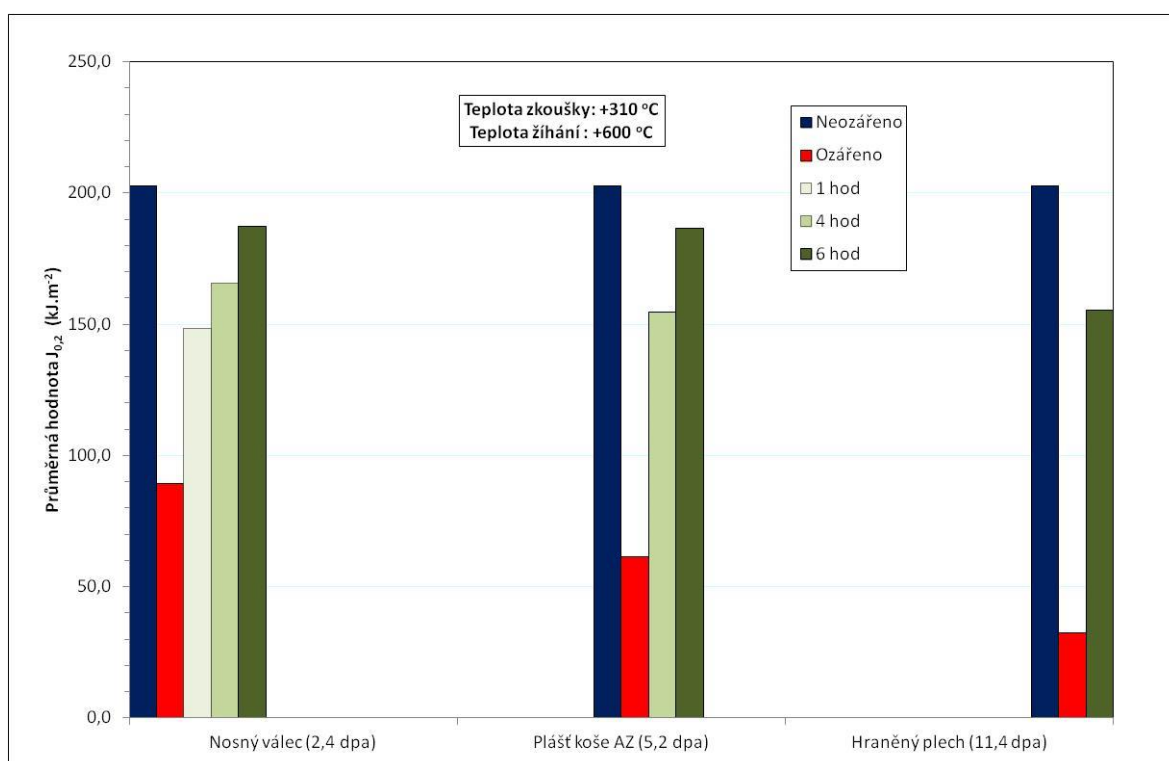
Obr. 3: Záznam ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na plastické deformaci při zkušební teplotě +24 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného stavu materiálu se zkušebními tělesy žihány po dobu 6 hodin (hraněný plech – 11,4 dpa).



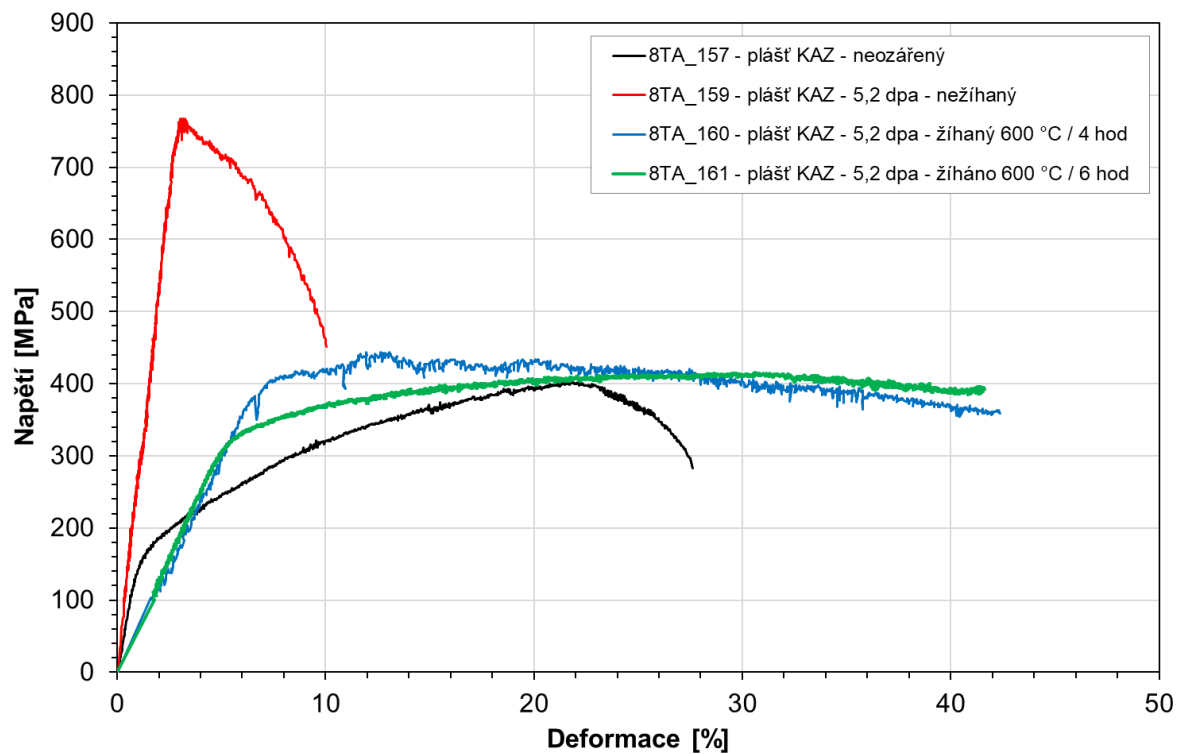
Obr. 4: Záznam ze zkoušky statické lomové houževnatosti ve formě závislosti normalizované síly na plastické deformaci při zkušební teplotě +310 °C. Porovnání neozářeného a ozářeného stavu materiálu se zkušebními tělesy žihány po dobu 6 hodin (hraněný plech – 11,4 dpa).



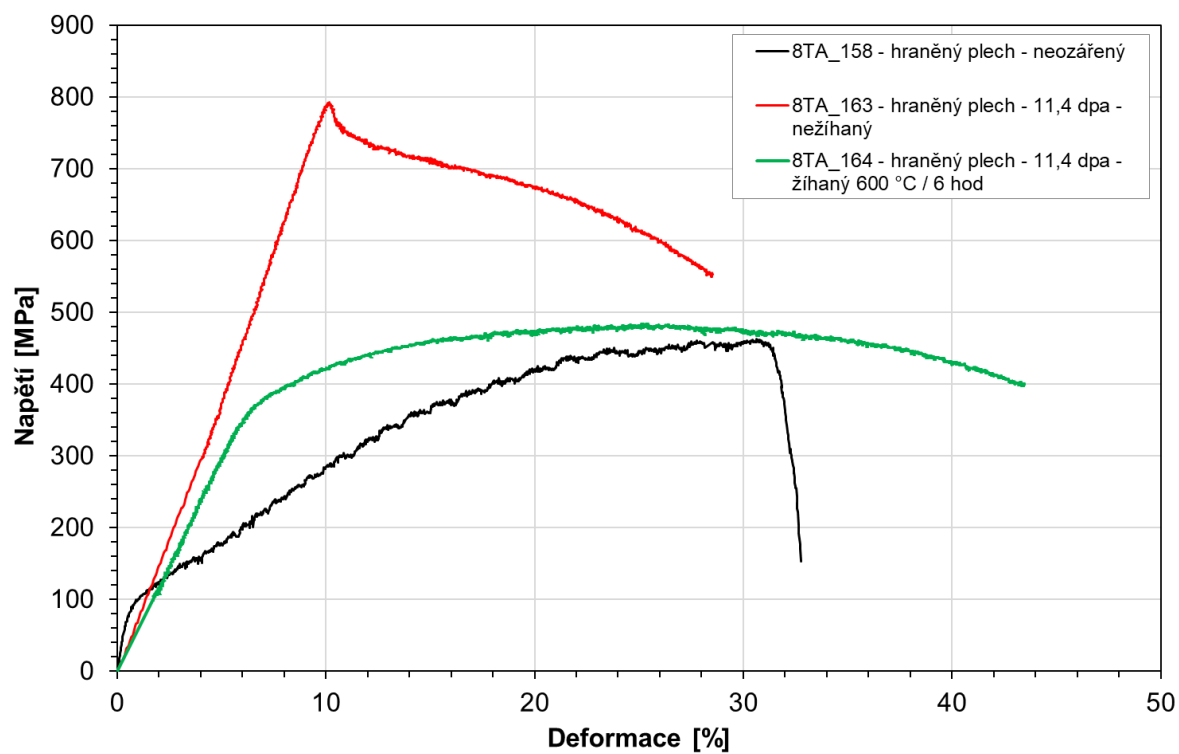
Obr. 5: Porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ při zkušební teplotě +24 °C a teplotě žihání 600 °C



Obr. 6: Porovnání průměrných hodnot kritické hodnoty J-integrálu $J_{0,2}$ při zkušební teplotě +310 °C a teplotě žihání 600 °C



Obr. 7: Srovnání deformačních křivek materiálu pláště KAZ



Obr. 8: Srovnání deformačních křivek materiálu hraněného plechu

POSOUZENÍ VLIVU RADIAČNÍHO BOBTNÁNÍ A TEČENÍ NA PLÁŠŤ AKTIVNÍ ZÓNY REAKTORU VVER 1000

Matěj Listík, Vladislav Pištora a Miroslav Pošta

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Plášť aktivní zóny (PAZ) je významnou komponentou vnitřních částí reaktoru typu VVER 1000. PAZ je při provozu vystaven účinkům tepelného a radiačního namáhání. Působením těchto účinků dochází k degradaci materiálových vlastností PAZ, zejména k radiačnímu bobtnání (swelling) a tečení (creep). V příspěvku se zabýváme hodnocením radiačního bobtnání a tečení a jejich vlivu na provozuschopnost (geometrické rozměry) PAZ. Posouzení je prováděno simulací metodou konečných prvků s použitím třídímenzionálního modelu a postupů hodnocení založených na současné mezinárodní praxi.

Tato práce je zaměřena na pevnostní výpočty, které navazují na modelování neutronové kinetiky programem TORT a termohydraulické výpočty provedené programem RELAP5. Pomocí programu TORT byly získány distribuce dávky ozáření rychlými neutrony (dpa) v PAZ a rozložení vnitřních zdrojů tepla v PAZ vyvolaných gama a neutronovým zářením. Pomocí programu RELAP5 byly získány teploty chladiva a koeficienty přestupu tepla na povrchu PAZ pro normální provozní podmínky (výkonový stav). Teploty chladiva a koeficienty přestupu tepla byly potom použity jako okrajové podmínky následné strukturální analýzy PAZ.

Teplotní a mechanická úloha byly řešeny pomocí konečněprvkového programu Abaqus. Byl zkonstruován třídímenzionální konečněprvkový výpočetní model představující symetrickou dvanáctinu PAZ a šachty reaktoru. Vztahy pro stanovení radiačního bobtnání a tečení byly implementovány pomocí uživatelských subrutin programu Abaqus v jazyku Fortran. Mechanická úloha byla řešena jako úloha visko-elasto-plasticity.

Pole deformací v důsledku radiačního bobtnání a tečení byla vypočtena pro předpokládanou životnost 60 kampaní. Změna tvaru a rozměrů pláště aktivní zóny byla stanovena pro studený a výkonový stav každé kampaně až do konce předpokládané životnosti reaktoru. Byla vyhodnocena velikost mezery mezi vnitřním povrchem PAZ a palivovými kazetami reaktoru a také velikost mezery mezi vnějším povrchem PAZ a šachtou reaktoru.

LABORATORNÍ HODNOCENÍ STAVU POTRUBÍ VODÍKOVÉHO CHLAZENÍ ETE PO 20 LETECH PROVOZU

THE EVALUATION OF ETE HYDROGEN COOLING PIPE CONDITION AFTER 20 YEARS OF OPERATION

Miroslav Krpec, Dana Tonarová, Zbyněk Veselka, Zuzana Vávrovcová a Petr Brabec
ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

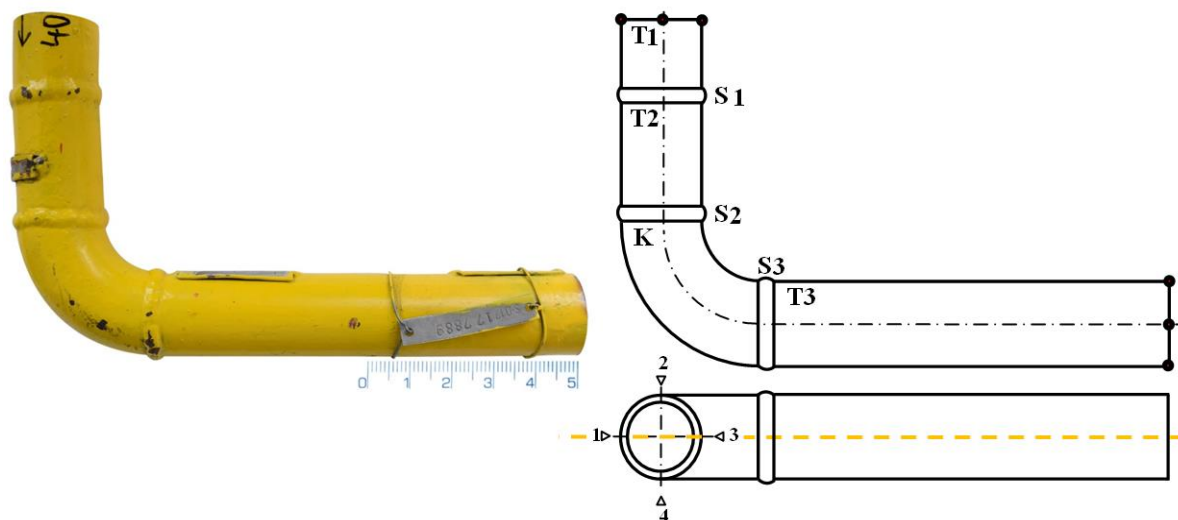
Hodnotící zpráva shrnuje výsledky nedestruktivního a destruktivního hodnocení potrubní trasy vodíkového chlazení JE Temelín po 20 letech provozu. Nepoškozená část vyříznutého potrubí byla do ÚJV Řež, a. s. dodána na základě předchozí zjištěné netěsnosti v rozvodném systému u obdobného typu potrubí. Cílem provedených prací bylo posoudit stav základního materiálu potrubí a svarových spojů a ověřit vliv dlouhodobého provozu na materiál.

Abstract

The evaluation report summarizes the results of the non-destructive and destructive evaluation of the Temelín NPP hydrogen cooling pipeline route after 20 years of operation. Based on a previously detected leak, the undamaged part of the cut-out pipeline was delivered to ÚJV Řež, a. s. The aim of the work was to assess the condition of the base material of pipes and welded joints and to verify the impact of long-term operation on the material.

Úvod

Pro zjištění stavu potrubí po 20 letech provozu byla do ÚJV Řež, a. s., v rámci výměny armatury 1WL11S001, dodána během května 2020 část vyříznuté potrubní trasy 1WL11Z001 (obr. 1) přívodu vodíku do strojovny. Výsledky hodnocení jsou shrnuty v rámci technické zprávy [1].



Obr. 1: Část vyříznutého potrubí 1WL11Z001: dodaná část (vlevo) a schéma jednotlivých částí a svarů (vpravo)

Materiál a použitá metodika

Potrubí z nízkolegované oceli (skupina 1 dle ČSN CR ISO 15608, viz tab. 1) o rozměrech $\text{Ø } 44,5 \times 2,6 \text{ mm}$ bylo provozováno cca 20 let a sloužilo pro přívod vodíku do strojovny HVB 1. V potrubí byly následující provozní podmínky: tlak 1 MPa, projektová teplota 70 °C a pracovní teplota $20\text{-}30 \text{ °C}$. Dodané potrubí se skládá z několika částí (obr. 1). Na přímou část potrubí délky cca 215 mm (T3) je obvodovým tupým svarem přivařeno 45° koleno (K), ke kterému je

obvodovým tupým svarem přivařena trubková přímá část délky cca 55 mm (T2) a přímá část délky cca 35 mm (T1).

Tab. 1: Vlastnosti skupiny materiálu 1 dle normy ČSN CR ISO 15608

Oceli s minimální mezí kluzu $ReH \leq 460 \text{ N/mm}^2$ a obsahem prvků v hm. %					
C $\leq 0,25$	Si $\leq 0,60$	Mn $\leq 1,8$	Mo $\leq 0,70$	S $\leq 0,045$	P $\leq 0,045$
Cu $\leq 0,40$	Ni $\leq 0,5$	Cr $\leq 0,3$	Nb $\leq 0,06$	V $\leq 0,1$	Ti $\leq 0,05$

Pro posouzení stavu základního materiálu potrubí a svarových spojů a ověření vlivu dlouhodobého provozu na materiál bylo provedeno nedestruktivní a destruktivní hodnocení v akreditovaných laboratořích zhotovitele.

Nedestruktivní hodnocení

Nedestruktivní hodnocení bylo zaměřeno na vizuální, kapilární kontrolu vnějšího a vnitřního povrchu, rozměrovou kontrolu a stanovení chemického složení částí komponenty.

- *Vizuální a kapilární kontrola vnitřního a vnějšího povrchu potrubí* byla provedena dle ČSN EN ISO 17637 s vyhodnocením dle ČSN EN ISO 5817, stupně jakosti B. Kapilární zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 3452-1 s vyhodnocením dle ČSN EN ISO 23 277, stupně přípustnosti 2X.
- *Rozměrová kontrola* (měření vnějšího průměru a tloušťky stěny) byla provedena na všech částech potrubí, kromě kolene, kde byla změřena pouze tloušťka stěny. Vnější průměr i tloušťka stěny byly v řezu měřeny obvodově ve čtyřech místech vždy po 90°.
- *Stanovení chemického složení základních materiálů* metodou optické emisní spektrometrie, prostřednictvím stacionárního analyzátoru Q4 Tasman (výrobce Bruker).

Destruktivní hodnocení

Destruktivní hodnocení sestávalo z metalografických analýz a z mechanických zkoušek.

- *Hodnocení makro a mikrostruktury* v podélných řezech bylo realizováno pomocí světelného mikroskopu Nikon Eclipse MA200 s využitím obrazové analýzy v programu NIS – Elements AR 5.11.
- *Stanovení tvrdosti ZM a mikrotvrdosti SK* pomocí tvrdoměru FALCON 608FA v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1. Podmínky zatěžování pro tvrdost HV_{10} byly 10 kg po dobu 10 s, resp. 100 g po dobu 10 s pro mikrotvrdost $MHV_{0,1}$.
- *SEM + EDS/WDS hodnocení vad a mikroanalýza svarových spojů* byla pořízena v sekundárních (SE) a zpětně odražených elektronech (BSE) na rastrovacím elektronovém mikroskopu VEGA TS 5130 XM (od firmy Tescan). Semikvantitativní analýzy byly provedeny na analyzátoru INCA Energy 350 (od firmy Oxford Instruments, připojeném na SEM s řídicím softwarem AZtec verze 3.1. Chemické čištění korozních produktů bylo provedeno dle normy ČSN ISO 8407.
- *Mechanické vlastnosti* trubek byly stanoveny při 24 °C v souladu s příslušnou technickou normou ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška byla prováděná na zkušebním stroji Zwick-Roell 250kN vždy na 3 ks ZT vyrobených v podélném směru trubky (L).

Výsledky

Nedestruktivní hodnocení

Z výsledků měření vnějšího průměru a tloušťky stěny bylo zjištěno, že požadavek na tloušťku stěny 2,6 mm splňují všechny části výřezu potrubní trasy 1WL11Z001.

Prvotní vizuální kontrola zjistila na vnějším povrchu v ohybu, resp. oblasti kolene K přítomnost mikrotrhlin, které vznikly pravděpodobně v důsledku výrobnímu procesu. Vnitřní povrch byl na všech částech, kromě trubky T1, pokryt černými oxidickými úsadami. Povrch trubky T1 byl kovově lesklý. V oblasti svarových spojů, které byly detailně hodnoceny, lze za vyhovující

hodnotit svar S2. U svaru S1 se na vnitřním povrchu vyskytovaly nevyhovující 3 kořenové housenky. Dále byly na svaru S1 dle ČSN EN ISO 5817, stupně jakosti B identifikovány další nepřípustné vady (neprůvar), u svaru S3 nepřípustná vada pór. Na všech svarech se mimo výše zmíněného vyskytovala v kořenové oblasti tenká svrchní pórovitá vrstva, svědčící o nepřítomnosti ochranného plynu při svařování.

Kapilární hodnocení potvrdilo na vnějším a indikovalo na vnitřním povrchu ohybu K výskyt mikrotrhlin. V příčném řezu svaru S3 byla naměřena okrouhlá indikace (pór) o průměru cca 2,5 mm. Další indikace v oblasti svaru S3 byla vyhodnocena jako indikace falešná, neboť vizuální kontrola prokázala v tomto místě zbytek neodstraněné podkladové barvy.

Destruktivní hodnocení

Metalografické hodnocení bylo provedeno na několika podélných řezech, kde bylo přes svařové spoje také provedeno měření mikrotvrdosti. Metalografické hodnocení potvrdilo u svařového spoje S1 přítomnost třech kořenových housenek s rozdílnými mikrostrukturami (martenzit, bainit, ferit + perlit). Dle dostupné literatury se martenzitická, a posléze bainitická mikrostruktura jeví jako nejméně odolná vůči vodíkové křehkosti, a proto by se mělo po svařování zařadit TZ (žihání), aby vznikla popuštěná martenzitická, případně popuštěná bainitická mikrostruktura. Na přechody mezi uhlíkovými a korozivzdornými oceli, tzv. HSS spoji je doporučeno používat svařovací dráty o vyšším obsahu Cr a Ni, než bylo zjištěno u studovaného heterogenního svaru S1. Metalografií byla dále potvrzena přítomnost porézní povrchové vrstvy (pravděpodobně struska) na vnitřním povrchu všech SK. Její tloušťka se pohybovala od 50 do 150 μm . Korozní vrstva do tloušťky 20 μm byla identifikována na vnitřním povrchu trubky T2 a dále se vyskytovala na vnějším povrchu pod ochranným nátěrem i po jeho odstranění v oblasti SK i ZM do tloušťky 50 μm , lokálně i 200 μm . Vady (dutiny) ve SK byly vyplněny struskou. Hodnocením příčného řezu kolene K byly na vnitřním povrchu potvrzeny interkrystalické mikrotrhliny do hloubky 50 μm , na vnějším povrchu transkrystalické trhliny do hloubky 80 μm . Šířka trhlin byla na vnějším povrchu cca 75 μm , na vnitřním cca 35 μm .

Mikroanalýzou svařových spojů bylo zjištěno, že u všech SK, resp. jejich částí (koruna, výplň, kořen), byl použit stejný svařovací drát, jehož chemické složení odpovídá svařovacímu drátu pro nelegované oceli. Povrchové porézní vrstvy s vysokým obsahem Si a Mn, které byly vizuálně na vnitřním povrchu patrné, odpovídají chemickému složení strusky. Zbylé vrstvy (vnitřní povrch trubky T2 a T3, vnější povrch všech svařových spojů) lze považovat za vrstvy korozní.

Stanovení mechanických vlastností bylo provedeno na miniaturizovaných ZT. Z každé části potrubní trasy, kromě kolene, byly vyrobeny tři ploché ZT. Z grafického znázornění tahové křivky je patrné, že materiál trubky T1 odpovídá korozivzdorné oceli, zbylé trubky T2 a T3 ocelím uhlíkovým s výraznou mezí kluzu. Naměřené hodnoty splňují požadavky na $\text{ReH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$, které jsou uvedeny v ČSN CR ISO 15608 pro materiálovou skupinu 1.

Stanovením chemického složení jednotlivých částí metodou OES bylo potvrzeno použití rozdílných tříd ocelí. Trubka T1 odpovídá chemickému složení materiálu GOST 08CH18N10T. Zbylé části (T2, K, T3) odpovídají chemickému složení uhlíkové oceli. Vady zjištěné na analyzovaných komponentách byly klasifikovány jako výrobní. Na žádné z komponent nebylo nalezeno poškození, které by svědčilo o iniciování nebo šíření vad podporovaných prostředím. Proto lze konstatovat, že vliv provozního média na degradaci materiálu potrubí je nevýznamný. Výsledky hodnocení je přesto nutné vztahovat pouze k hodnocené části trasy 1WL11Z001 a nelze je obecně využít k problematice degradace materiálu vlivem vodíku.

Závěr

Na základě nedestruktivního a destruktivního hodnocení stavu potrubí lze konstatovat následující:

- Všechny části potrubí splňují požadavek na minimální tloušťku stěny.
- Metodami vizuální a kapilární kontroly byla zjištěna přítomnost mikrotrhlin na vnějším i vnitřním povrchu kolene nepřesahující hloubku 0,1 mm, které pravděpodobně vznikly během výrobního procesu.
- Dle ČSN EN ISO 5817, stupně jakosti B lze svarové spoje S1 a S3 označit za nevyhovující.
- Na všech svarech se vyskytovala v kořenové oblasti povrchová pórovitá vrstva (struska), svědčící o nepřítomnosti ochranného plynu při svařování.
- Metalografickým hodnocením byla kromě strusky na vnitřním povrchu zjištěna i korozní vrstva na vnějším povrchu.
- Chemické složení všech svarových spojů odpovídá svařovacímu drátu pro nelegované oceli.
- U HSS se doporučuje používat svařovací dráty o vyšším obsahu Cr a Ni, než bylo zjištěno u heterogenního svaru S1.
- Chemické složení trubky T1 odpovídá materiálu GOST 08CH18N10T, zbylé části (T2, K, T3) odpovídají chemickému složení uhlíkové oceli.
- Naměřené hodnoty ReH všech částí z uhlíkové oceli splňují požadavky na $ReH \leq 460 \text{ N/mm}^2$, které jsou uvedeny v ČSN CR ISO 15608 pro materiálovou skupinu 1.

Literatura

- [1] Krpec, M., Tonarová, D. (2020): *Hodnocení potrubní trasy 1WL11Z001 v systému vodíkového hospodářství ETE*. Odborná zpráva, ÚJV Řež, a. s., Husinec – Řež.

ZVYŠOVÁNÍ A OVĚŘOVÁNÍ ODBORNÉ ZPŮSOBILOSTI SVÁŘEČŮ PRO SVAŘOVÁNÍ VYBRANÝCH ZAŘÍZENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN

INCREASING AND CERTIFYING THE PROFESSIONAL COMPETENCE OF WELDERS FOR WELDING SELECTED NPP EQUIPMENT

Petr Fousek

ČEZ, a. s., Řízení kvality JE

Abstrakt

Příspěvek se zabývá požadavkem Normativně technické dokumentace A.S.I. Sekce I, týkající se svařování vybraných zařízení na jaderných elektrárnách typu VVER. Tato dokumentace obsahuje požadavek na ověřování znalostí personálu provádějících tyto svářečské práce formou atestací. Držitel povolení v návaznosti na požadavek zahájil atestaci pracovníků svých dodavatelů provádějících svářečské práce na vybraných zařízeních JE. Tento článek podává přehled o tom, co tyto atestace obsahují, jak a kým se provádějí a jaká je jejich legislativní základna.

Abstract

The paper deals with the requirement of the Normative Technical Documentation of A.S.I. Section I, concerning the welding of selected equipment at VVER type nuclear power plants. This documentation contains a requirement to verify the knowledge of the personnel performing these welding works in the form of attestations. The holder of the NPP operating license, ČEZ, faced this task and began attesting the employees of its suppliers performing welding work on selected NPP equipment. This article gives an overview of what these attestations contain, how and by whom they are carried out and what their legislative basis is.

1. Úvod

Hlavním cílem zavedení atestací svářečského personálu ve firmě ČEZ, a. s., bylo průběžné zvyšování odborných znalostí a praktických dovedností zaměstnanců pracujících v oblasti svařování. Provozovatel jaderné elektrárny (JE) musí mít jistotu, že personál vykonávající zvláštní procesy je opravdu na požadované úrovni, a to byl jeden z hlavních důvodů vznik tréninkového a realizačního centra (TaRC), které je umístěna v lokalitě JE Temelín. Toto centrum bylo otevřeno k 17. 4. 2019 a od té doby zajišťuje provádění atestací svářečů a další činnosti jako jsou například atestace za oblast NDT, expertní analýzy a výkon materiálové laboratoře.

Hlavním důvodem, proč byla zvolena varianta využití vlastních kapacit je to, že společnost ČEZ, a. s. Divize jaderná energetika (dále DJE se jako Držitel povolení zodpovědný za bezpečný provoz svých jaderných elektráren a kdo jiný než sama společnost ČEZ, a. s. je více motivován provést výcvik a školení a ověření znalostí svářečského personálu v požadované kvalitě než držitel povolení. Zároveň je nejlépe schopen připravovat školení a praktický výcvik s ohledem na zařízení a aktuální potřeby pro jeho opravy a rekonstrukce.

2. Legislativní rámec

Proces svařování je pro údržbu jaderných elektráren jedním z klíčových proto je nezbytně nutné klást dostatečný důraz na kvalitu prováděných svářečských prací a dostatečnou přípravu svářečského personálu. Zároveň se obor svařování se neustále vyvíjí, vznikají nové technologie a postupy svařování. Tento neustálý vývoj je třeba trvale monitorovat a vhodně implementovat mezi naše aktuálně používané technologie a postupy svařování na JE.

Jedním z klíčových dokumentů upravujících oblast svářečských prací je dokument NTD A.S.I. Sekce I. Jde o Normativně technickou dokumentaci Asociace strojních inženýrů (NTD

A.S.I.). Tato technická dokumentace obsahuje devět sekcí. Každá sekce se zabývá konkrétními činnostmi prováděných na jaderných elektrárnách typu VVER [1].

Sekce I se zabývá Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER. Tento dokument tvoří soubor pravidel pro výrobu, montáž, rekonstrukce a provoz (údržbu a opravy) zařízení a potrubí elektráren typu VVER [2].

Další z dokumentů, které by měly být zmíněny je Vyhláška č. 358/2016 Sb. o požadavcích na zajišťování kvality a technické bezpečnosti a posouzení a prověřování shody vybraných zařízení. Kromě toho, že tato vyhláška obsahuje seznam vybraných zařízení, rozsah a způsob zajišťování kvality vybraných zařízení a technické požadavky na vybraná zařízení v Příloze 2, Kapitole 6, odstavec 6.5 uvádí následující:

„Tyto pracovní postupy a příslušní pracovníci provádějící nerozebíratelné spoje a pracovníci svářečského dozoru musí být odsouhlaseni autorizovanou osobou, nejde-li o nerozebíratelný spoj na vybraném zařízení uvedeném v § 12 odst. 3.“ [4].

Požadavek „odsouhlasení autorizovanou osobou“ byl implementován do NTD A.S.I. Sekce I. A to konkrétně do Kapitoly 6.2.3, která se nazývá „Atestace svářečů/operátorů pro svařování vybraných zařízení JE“. V této kapitole se mimo jiné uvádí:

„Atestace svářečů/operátorů, kteří budou svařovat VZ podle vyhlášky č. 358/2016 Sb. při údržbě JZ se provádí podle dokumentu zpracovaného držitelem povolení, který blíže specifikuje postup a požadavky na organizaci, řízení, plánování, přípravu, realizaci, kontroly, dokumentaci a dozor při atestačních zkouškách.“ [3].

Pro splnění tohoto požadavku vydal Držitel povolení interní dokument s názvem „Atestační zkoušky svářečů / operátorů pro svařování vybraných zařízení JE“.

3. Zvyšování a ověřování odborné způsobilosti svářečů prostřednictvím atestačních zkoušek

3.1 Zvyšování odborné způsobilosti

Jak již bylo dříve uvedeno zvyšování a ověřování odborné způsobilosti svářečů vychází z požadavků legislativy ČR.

Z tohoto důvodu ČEZ, a. s. Divize jaderná energetika, jakožto držitel povolení vydal interní metodiku, které zavádí výše uvedené požadavky.

Nyní se blíže seznámíme postupem atestací svářečů pracujících na vybraných zařízeních JE. Atestace je určena pro zaměstnance ČEZ, a. s., z DJE a dodavatele, kteří se podílejí svařování vybraných zařízení JE [3].

Podmínky přístupu k atestacím jsou tyto:

- platný certifikát dle ČSN EN ISO 9606-1 v dané metodě, typu spoje, poloze atd.,
- absolvování teoretické a praktické přípravy.

3.1.1 Teoretická příprava

Cílem teoretické přípravy je seznámit posluchače s níže uvedenými tématy [3]:

1. základní materiál zařízení JE,
2. manipulace s CrNi materiály,
3. přídavné materiály pro svařování zařízení JE,
4. NTD A.S.I. Sekce I v platném znění,
5. vizuální a rozměrová kontrola,
6. technické podmínky na svařování,
7. technické podmínky pro čistotu,
8. kvalifikace personálu pro svařování zařízení JE,
9. postupy svařování (WPQR, WPS),

10. bezpečnost práce,
11. zásady technologické kázně,
12. specifikace výrobku,
13. zkušenosti,
14. program a popis zkoušky.

Během teoretické přípravy lektor prochází jednotlivými tématy a průběžně prověřuje posluchače, zdali dané problematice porozuměli. Dále jsou posluchači seznámeni s interní dokumentací ČEZ, a. s. související se svařovacím procesem. Vzhledem ke snaze zajistit posluchačům maximální kvalitu školení je počet posluchačů omezen na maximálně 6 posluchačů pro jeden kurz.

3.1.2 Praktická příprava

Během praktické přípravy uchazeči svařují ve svařovně TaRC zkušební kusy v souladu s programem praktické přípravy. Pod dohledem svářečského instruktora TaRC, který zajišťuje část praktického výcviku.

Program praktické přípravy obsahuje níže uvedené body [3]:

1. program praktické přípravy a jeho rozsah v hodinách,
2. stanovení zkušebních kusů pro praktickou přípravu,
3. stanovení postupu svařování (pWPS, WPS nebo WI),
4. popis provedení zkoušky,
5. prováděné kontrolní operace v průběhu praktické přípravy,
6. požadavky na NDT kontroly včetně kritérií pro vyhodnocení.

Praktická příprava je dokončena po zavaření předepsaných vzorků a jejich vizuálním vyhodnocením příslušným zaměstnancem TaRC s potřebnou kvalifikací v metodě VT.

3.2 Ověřování odborné způsobilosti

Ověřování odborné způsobilosti svářeče je prováděno atestační zkouškou.

Atestační zkouška se skládá z teoretické a praktické části [1].

Teoretická část zkoušky je prováděna formou testu na PC, Test obsahuje 30 otázek. Ke každé otázce jsou 3 odpovědi, z nichž je pouze 1 správná. Test obsahuje vybrané otázky z aktuální a pravidelně doplňované databáze testových otázek.

Tato zkouška je zaměřena na znalosti technologie procesu svařování, základních a přídatných materiálů využívaných pro svařování. Teoretická příprava je společná pro všechny metody svařování a její platnost je 36 měsíců, poté musí být zopakována.

Praktická část zkoušky požaduje zavařit zkušební svarový spoj v rozsahu požadované atestační zkoušky. Platnost praktické části atestační zkoušky je 18 měsíců.

Pro posouzení teoretických znalostí a praktických dovedností je pro každou atestační zkoušku schválena Atestační komise [1].

Atestační komise – nezávislá odborná komise schválená Garantem zvláštních procesů DJE, na základě žádosti TaRC, která posuzuje teoretické znalosti a praktické dovednosti svářeče pro svařování vybraných zařízení JE. [3]:

Předseda komise [3]: Garant zvláštních procesů DJE nebo jím jmenovaný zástupce.

Členové komise [3]:

- AO (zkušební komisař pro zkoušky svářečů / operátorů),
- svářečský dozor dodavatele nebo svářečský technolog ČEZ, a. s., s kvalifikací IWE/EWE nebo IWT/EWT a příslušnou kvalifikací dle NTD A.S.I. Sekce I,
- zkoušek se mohou zúčastnit zástupci útvaru technická bezpečnost a SÚJB.

4. Hodnocení znalostí uchazečů

Teoretická i praktická část zkoušky se hodnotí samostatně.

4.1. Teoretická část

Pro úspěšné složení teoretické atestační zkoušky musí svářeč pro svařování vybraných zařízení JE dosáhnout minimálně 60 % správných odpovědí [3].

Pokud uchazeč neuspěje při teoretické atestační zkoušce, nepokračuje dále k praktické části a může zkoušku opakovat nejdříve za 14 dní od termínu neúspěšné zkoušky. Atestační komise má však pravomoc povolit opakování zkoušky v kratší době [3].

Úspěšný uchazeč postupuje dále k vykonání praktické části zkoušky.

4.2. Praktická část

Zkušební kusy jsou před zahájením atestační zkoušky označeny AO a předsedou atestační komise [3]. Svářečský technolog ČEZ, a. s., v TaRC předloží, před atestační zkouškou, atestační komisi vyhovující VT protokol zhotovených kusů praktické přípravy svářeče a kopii protokolu o složení teoretické atestační zkoušky [3]. Následně proběhne samotné zavaření zkušebních spojů v rozsahu požadované atestační zkoušky.

První posouzení svarových spojů zhotovených zkušebními kusy provede atestační komise. V případě kladného hodnocení všech členů atestační komise budou následně zkušební kusy postoupeny AO a vyhodnoceny dle předem stanovených kritérií.

Vyhodnocení je provedeno podle NTD A.S.I. – Sekce VII v platném znění pro požadovanou kategorii svarového spoje. Svarové spoje jsou zkontrolovány metodami VT a RT. Pokud na zkušebním kusu nelze provést RT kontrolu, je provedena zkouška rozlomením nebo kontrola makrostruktury svarového spoje minimálně ve 2 řezech. Z výše uvedených NDT a případných DT je vždy vystaven protokol [3].

4.3 Celkové hodnocení

Celkové hodnocení obou částí atestační zkoušky se zaznamenává do Protokolu atestační komise o atestační zkoušce svářeče pro svařování vybraných zařízení JE, který schvaluje předseda atestační komise spolu s inspektorem Autorizované osoby, popřípadě ještě nezávislá osoba (pokud se atestací zúčastnila).

5 Atestace

Na základě splnění požadavků je svářečům vybraného zařízení JE podle § 12 odst. 2 vyhlášky č. 358/2016 Sb., kteří úspěšně vykonali atestační zkoušky, vystaven AO dokument „Schválení svářeče pro svařování vybraných zařízení JE“. Platnost tohoto osvědčení je 18 měsíců. Poté musí svářeč absolvovat celý proces znovu.

Literatura

- [1] Konference: *Zvyšování a ověřování odborné způsobilosti pracovníků NDT provádějících zkoušky na vybraných zařízeních jaderných elektráren.*
- [2] NTD A.S.I.: *Normativně technická dokumentace A.S.I. Sekce I. A.S.I.* [Asociace strojních inženýrů], Praha, Brno.
- [3] ČEZ, a. s.: *Interní dokumentace ČEZ a. s. Divize jaderná energetika.*
- [4] Sbíрка zákonů České republiky (2016): *Vyhláška č. 358/2016 Sb., o požadavcích na zajišťování kvality a technické bezpečnosti a posouzení a prověřování shody vybraných zařízení.* Sbíрка zákonů České republiky. ISSN 1211-1244

REJSTŘÍK AUTORŮ

A

Aparicio 85

B

Bátěk 41

Běláč 55, 61

Bělohoubek 7

Bobčík 7

Brabec 201

Brom 167

Buršík 191

C

Cizner 179

Č

Čančura 73

Čapek 147

Čech 143

Česánek 173

Čmakal 107

D

Dostál 35

Ducháček 73

Dvořák 93, 107

F

Fousek 205

Fukač 85

Fulín 113

G

Gál 41

Ganev 147

Gávelová 67

H

Halodová 61, 67

Houdek 1

Houdková 173

Hruška 179

Hudec 119

Hus 17

CH

Chocholoušek 113, 167

J

Jarugula 67

K

Klíma 131

Klouzal 35

Kolařík 147

Kopeć 29

Kopřiva 191

Kotassková 161

Koula 93, 119

Král 93, 107

Krhounek 41

Krpec 201

Kšíňanová 173

Kubín 1, 7

Kuchařová 107

Kůs 167

Kvapilová 93, 107

L

Linhart 55, 61

Listík 199

Liška 7

Lukavský 137

M

Majka 131

Malá 29, 61

Mareš 101, 125

Marková 161

Martinec 17

Marušáková 85

Materna 191

Matocha 29, 35

Matoušková 55

Mlčoch 161

Mlnářik 179

N

Naďová 173

Neumannová 143

P

Palán 73

Pašta 29

Patera 167

Pištora 41, 83, 199

Polach 157

Polcar 7

Pošta 83, 199

Prešl 161

Prostřední 131

R

Rosnecký 67

Ruchař 17, 21

Ruml 151

Rusňáková 191

Ř

Řeháček 55

S

Schnablová 191

Schubert 173

Schuster 13

Sklenička 93, 107

Smolík 1

Soukup 77

Srba 61

Stainer 185

Starý 55

Strejcus 113, 167

Svobodová 93, 107

Sýkora 161

Š

Ševeček 55, 61, 67

Šifner	93, 119
Šišková	83
Špirit	101, 113
Štábl	143
Štarman	47

T

Tomáš	137
Tonarová	201
Trojan	147

V

Vávrovcová	201
Veselá	101, 167
Veselka	201

Vlasák	143, 151
Vlček	125, 167
Vnouček	77
Vostřák	173

W

Wandrol	41
---------------	----

Z

Záviška	185
Zháňal	67
Zimina	61, 67

Ž

Žďárek	41, 147
--------------	---------

Kolektiv autorů

Sborník z 16. konference

„Životnost komponent energetických zařízení“

Srní, 19. – 21. října 2021

Západočeská univerzita v Plzni

Vydavatelství

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach a Lukáš Stuna

Počet stran: 255

Vydání první

Náklad: 180 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Pavel Polach, Petr Zuna, Martin Kronďák a Radovan Šťastný

ISBN 978-80-261-1045-3

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2021