

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
15. – 17. října 2024

Kolektiv autorů

Sborník z 19. konference
„Životnost komponent energetických zařízení“
Srní, 15. – 17. října 2024

ISBN 978-80-261-1224-2
© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2024

ZÁŠTITA MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU



MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU

Ing. Jozef Síkela
ministr

uděluje

Z Á Š T I T U

MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU

19. ročníku konference Životnost komponent energetických zařízení,
která se uskuteční ve dnech 15. – 17. října 2024 v Hotelu Srní – Šumava

V Praze dne 4. června 2024



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU

ODBORNÍ GARANTI

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

PROGRAMOVÝ VÝBOR

doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D. – VZÚ Plzeň
Ing. Zdeněk Čančura, Ph.D. – ČEZ, a. s.
Prof. Ing. František Hrdlička, CSc., FEng. – ČVUT v Praze, FS
Ing. Martin 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. Tomáš Zajíc, MBA – ČEZ, a. s.
Ing. Jan Zdebor, CSc., FEng. – ZČU v Plzni, FS
Prof. Ing. Petr Zuna, CSc. D. Eng.h.c., FEng. – ČVUT v Praze, FS, IA ČR

ORGANIZAČNÍ VÝBOR

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

GENERÁLNÍ PARTNEŘI



ÚJV Řež, a. s.



SKUPINA ČEZ

HLAVNÍ PARTNER



DALŠÍ PARTNEŘI





MEDIÁLNÍ PARTNEŘI



ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDAJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK

ÚTERÝ 15. 10. 2024 (ODPOLEDNE)

1. BLOK PŘEDNÁŠEK

Využití vodíkových technologií & Materiálové technologie

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

2. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika svarů & Materiálové inženýrství

Řídí: doc. Ing. Šárka Houdková, Ph.D.

STŘEDA 16. 10. 2024 (DOPOLEDNE)

3. BLOK PŘEDNÁŠEK

Řešení projektů VaV

Řídí: Ing. Kamil Prešl

4. BLOK PŘEDNÁŠEK

Údržba a opravy komponent energetických zařízení

Řídí: Ing. Tomáš Zajíc, MBA

ČTVRTEK 17. 10. 2024 (DOPOLEDNE)

5. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

Řídí: Ing. Martin Kronďák, Ph.D.

6. BLOK PŘEDNÁŠEK

Problematika primárního okruhu jaderných elektráren

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

PŘEDMLUVA PROFESORA ZUNY

Vážené kolegyně, vážení kolegové,

dovolte mně prosím, abych Vás alespoň touto formou přivítal již na 19. konferenci v Srní. Svoji neúčast omlouvám ze zdravotních důvodů. Jsem přesvědčen, že to kvalitu konference neohrozí, a že na 20. výroční konferenci již budu přítomen osobně. Význam těchto energetických konferencí v současnosti roste a každý Váš příspěvek obohatí naše současné poznání v této tak aktuální oblasti. Jsem přesvědčen, že obvyklá pracovní i společenská atmosféra bude zachována a Vaše účast bude přínosem i potěšením.

Přeji Vám příjemný pobyt v Srní, hodně nových poznatků a dobrou náladu.

Petr Zuna

PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ

Dámy a pánové,

srdečně Vás vítám na devatenáctém ročníku energetické konference v malebném Srní. Je mi velkým potěšením vidět takové množství odborníků, kteří se zde sešli, abychom společně diskutovali o klíčových technických aspektech spojených s bezpečným a současně efektivním provozováním energetické infrastruktury. Vaše účast, ať už pravidelná nebo nová, svědčí o trvalém zájmu o tuto důležitou oblast, za což Vám všem srdečně děkuji.

Naše konference se stala platformou pro výměnu praktických znalostí a zkušeností v dynamicky se vyvíjejícím světě energetiky. Se stále se zrychlující globální transformací energetiky čelíme mnoha novým výzvám, od plynulého přechodu k novým energetickým zdrojům, rostoucího tlaku na dekarbonizaci a současně zajištění spolehlivosti energetické sítě. Jak se technologie vyvíjejí, tak i my musíme adaptovat naše přístupy k jejich životnímu cyklu, abychom zajistili nejen efektivitu, ale i minimální dopad na životní prostředí.

Do letošního ročníku jsme zařadili 36 příspěvků, včetně posterové sekce. Současně se můžeme těšit na tři plenární přednášky, pan Jaroslaw Swedowicz (Siemens Energy AG, Zurich): Quo vadis mechanics in industry? ...on the example of gas turbine technology, pan Ing. Pavel Vágner (ředitel sekce Business development a PMO, ČEPS): Technologické a inovační výzvy provozovatele přenosové soustavy a pan. Ing. Pavel Řežábek (hlavní ekonom ČEZ): Růst OZE a jeho důsledky. Vybrané odborné příspěvky pokryjí široké spektrum témat od monitorování a diagnostiky, přes prevenci selhání, až po moderní metodiky v oblasti údržby a správy energetických zařízení. Je nám ctí, že můžeme také představit příspěvky mladších odborníků, jejichž vize a nápady jsou klíčové pro budoucnost našeho odvětví.

Na závěr bych rád poděkoval našim partnerům a sponzorům, kteří se na organizaci konference podíleli, a také organizačnímu týmu, jehož práce nám umožnila setkat se v tomto krásném prostředí. Přeji Vám všem, aby letošní ročník konference byl nejen odborně přínosný, ale také příležitostí k navázání nových kontaktů a inspiraci pro další práci.

Těším se na přínosné diskuse a setkání s Vámi během následujících dnů.

Těším se na viděnou.

Stanislav Martínek

PROGRAM KONFERENCE

Úterý, 15. října 2024

Registrace účastníků v hotelu Srní u recepce, 10:00 – 18:00

Oběd v hotelu Srní, 11:30 – 12:45

Zahájení konference, 13:00

Zahájení konference: Stanislav Martínek (VZÚ Plzeň), Martin Ruščák (ÚJV Řež)
Novinky z VaV: Šárka Houdková (VZÚ Plzeň a Výzkumná rada TA ČR)
Organizační pokyny: Pavel Polach (VZÚ Plzeň)

1. blok přednášek – Pavel Polach, 13:30 – 15:30

13:30 – 14:00	Plenární přednáška – J. Swedowicz: Quo vadis mechanics in industry? ...on the example of gas turbine technology
14:00 – 14:15	V. Sklenička a kol.: Vliv vodíku na creepovou odolnost zirkoniového pokrytí jaderného paliva při provozní teplotě reaktoru
14:15 – 14:30	H. Jirková a kol.: Degradace plynárenské oceli vlivem elektrolytického vodíkování
14:30 – 14:45	D. Bricín a kol.: Isostatické lisování za tepla a jeho aplikace
14:45 – 15:00	J. Cizner a J. Hruška: Vlastnosti 3D tištěného materiálu HX pro potenciální použití v energetice
15:00 – 15:15	J. Veselá a P. Mareš: Využití nedestruktivního zkoušení k ověření vlastností ocelových desek vyrobených 3D tiskem
15:15 – 15:30	J. Antoš: Zvyšování životnosti a spolehlivosti energetických a zpracovatelských zařízení pomocí pokročilých povlakových systémů

Coffee break, 15:30 – 16:10

2. blok přednášek – Šárka Houdková (VZÚ Plzeň), 16:15 – 18:05

16:15 – 16:30	P. Cvešpr: Mobilní podpora pro diagnostiku komponent energetických zařízení ČEZ
16:30 – 16:45	M. Kepka Jr. a M. Kepka: Poznatky z experimentálního výzkumu únavové pevnosti a životnosti svařenců s aplikací vysokofrekvenčního mechanického zpevnování
16:45 – 17:00	P. Mareš a J. Veselá: Ultrazvukové zkoušení svarů parovodů
17:00 – 17:15	J. Dvořák a kol.: Vliv vrubu na creepovou odolnost nízkolegované Cr-Mo-V oceli (ČSN 15 128)
17:15 – 17:30	M. Kvapilová a kol.: Creepové chování superslitiny IN939 vyrobené metodou L-PBF
17:30 – 17:45	E. Chvostová a kol.: Hodnocení degradace ocelí 304H a HR3C pomocí malých vzorků
17:45 – 18:05	J. Tomas: Použití screeningové metody PECT při kontrole membránových stěn a její možnosti využití

Slavnostní večeře v hotelu Srní, 19:15

Středa, 16. října 2024	
Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15	
8:35 – 8:55	Posterová sekce – 3 postery
	J. Kahoun Hejhalová a kol.: Ozařovací experimenty konstrukčních ocelí na LVR-15
	P. Klatovská: Hodnocení vlivu tepelného stárnutí na materiálech primárního okruhu EBO-V1 v rámci projektu DELISA-LTO
	P. Konopík a J. Zmeko: Porovnání dvou metod in-situ tahových zkoušek simulujících vodíkové zkrěhnutí oceli 42CrMo4
3. blok přednášek – Kamil Prešl (ČEZ, a. s.), 9:00 – 10:45	
9:00 – 9:30	Plenární přednáška – P. Vágner: Technologické a inovační výzvy provozovatele přenosové soustavy
9:30 – 9:45	O. Frýbort a T. Melichar: Akumulace tepelné energie – vývoj, aktivity a pilotní jednotky
9:45 – 10:00	J. Žďárek: Evropský projekt OFFERR: Přínosy projektu pro prodloužení životnosti JE v EU
10:00 – 10:15	K. Sobek a kol.: Testování a analýzy betonů a kameniva z hlediska radiačního stárnutí
10:15 – 10:30	J. Brom a kol.: Vývoj pokročilých metod hodnocení stavu komponent
Coffee break, 10:30 – 11:15	
4. blok přednášek – Tomáš Zajíc (ČEZ, a. s.), 11:15 – 13:15	
11:15 – 11:45	Plenární přednáška – P. Řežábek: Růst OZE a jeho důsledky
11:45 – 12:00	A. Wessely a J. Nacházel: Test šroubů při těžkých zatíženích – mazání šroubů
12:00 – 12:20	T. Klíma: Ecol Lubrication Management – outsourcing mazání strojů a zařízení v souladu s novým standardem ICML 55
12:20 – 12:35	J. Kasl a kol.: Rozbor trhlin ve svarech kotlových trubek z oceli T24
12:35 – 12:50	O. Skála: Simulace žíhání svarů membránové stěny kotle
12:50 – 13:00	M. Stodola: Problematika žíhání oceli T24
13:00 – 13:15	F. Schmidt: Letecké inspekce v energetice
Oběd v hotelu Srní, 13:30 – 14:30	
Večeře, společenský večer v sále hotelu Srní – od 18:30 Bowlingový turnaj o „Pohár krále hotelů Šumava a Srní“ – od 20:00	
Tělocvična hotelu: Ukázka strojové inspekce pomocí nového leteckého dronu – 19:00 – 20:00	

Čtvrtek, 17. října 2024

Snídaně v hotelu Srní, 7:15 – 8:15

5. blok přednášek – Martin Krondák (ÚJV Řež, a. s.), 8:30 – 10:00

8:30 – 8:45	D. Dopjera: Profil trhlín (indikací) technikou TFM
8:45 – 9:00	T. Soukup: Jaderné opravárenství v praxi – výroba heterogenních svarových spojů
9:00 – 9:15	T. Trojan: Manipulátory a robotické systémy pro JE a energetiku
9:15 – 9:30	J. Strejcius a kol.: Nedestruktivní zkušební techniky pro kvantitativní hodnocení degradace tepelného stárnutí vnitřních částí VVER
9:30 – 9:45	O. Plíhal a D. Cvešper: Program řízeného stárnutí komoditní
9:45 – 10:00	F. Randák a F. Huptych: Životnost komponent důležitých pro přechodné období a pro vyřazování

Coffee break, 10:00 – 10:40

6. blok přednášek – Pavel Polach (VZÚ Plzeň), 10:40 – 12:15

10:40 – 11:00	V. Kříž: Inspekce BEM TM na potrubí chladicí vody v ETE
11:00 – 11:15	P. Šárek a kol.: Vysokohustotní paliva pro jaderné reaktory
11:15 – 11:30	V. Pištor a M. Listík: Výpočtové hodnocení radiačního bobtnání ve vnitřních částech reaktoru VVER-1000 v rámci mezinárodního benchmarku DELISA-LTO
11:30 – 11:45	P. Kůs a kol.: Limity chemických parametrů v primárním okruhu JE – možnost jejich úpravy
11:45 – 12:00	P. Gál: Výsledek národního projektu zaměřeného na tvorbu metodiky hodnocení tlakové nádoby reaktoru při těžké havárii
12:00 – 12:15	Z. Veselka a kol.: Interakce materiálu vnějšího pláště ukládacího obalového souboru vyhořelého paliva s bentonitovou bariérou v podmínkách hlubinného úložiště – projekt EURAD CONCORD

Oficiální ukončení konference, 12:15 – 12:30

Oběd v hotelu Srní, 12:45 – 13:45

OBSAH

ZÁŠTITA MINISTERSTVA PRŮMYSLU A OBCHODU	III
ODBORNÍ GARANTI	IV
PROGRAMOVÝ VÝBOR	IV
ORGANIZAČNÍ VÝBOR	IV
GENERÁLNÍ PARTNEŘI	V
HLAVNÍ PARTNER	V
DALŠÍ PARTNEŘI	V
MEDIÁLNÍ PARTNEŘI	VI
ODBORNÁ TÉMATA A PŘEDSEDÁJÍCÍ BLOKŮ PŘEDNÁŠEK	VII
PŘEDMLUVA PROFESORA ZUNY	VIII
PŘEDMLUVA ŘEDITELE VZÚ PLZEŇ	IX
PROGRAM KONFERENCE	X
OBSAH	XIII
VLIV VODÍKU NA CREEPOVOU ODOLNOST ZIRKONIOVÉHO POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA PŘI PROVOZNÍ TEPLOTĚ REAKTORU	1
THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE CREEP RESISTANCE OF ZIRCONIUM NUCLEAR FUEL CLADDING TUBES AT TEMPERATURE OF REACTOR OPERATION	
VÁCLAV SKLENIČKA, KVĚTA KUCHAROVÁ, PETR KRÁL, MARIE KVAPILOVÁ, JIŘÍ DVOŘÁK, VĚRA VRTÍLKOVÁ A JAKUB KREJČÍ	
DEGRADACE PLYNÁRENSKÉ OCELI VLIVEM ELEKTROLYTICKÉHO VODÍKOVÁNÍ	7
DEGRADATION OF GAS STEEL DUE TO ELECTROLYTIC HYDROGENATION	
HANA JIRKOVÁ, JOSEF DULÍŠKOVIČ, DAVID AIŠMAN A JOSEF KASL	
ISOSTATICKÉ LISOVÁNÍ ZA TEPLA A JEHO APLIKACE	13
HOT ISOSTATIC PRESSING AND ITS APPLICATION	
DAVID BRICÍN, ZBYNĚK ŠPIRIT A JOSEF STREJCIUS	
VLASTNOSTI 3D TIŠTĚNÉHO MATERIÁLU HX PRO POTENCIÁLNÍ POUŽITÍ V ENERGETICE	19
PROPERTIES OF 3D PRINTED HX MATERIAL FOR POTENTIAL ENERGY APPLICATIONS	
JOSEF CIZNER, JAN HRUŠKA A VÍT STEINER	
VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ K OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OCELOVÝCH DESEK VYROBENÝCH 3D TISKEM	25
USE OF NONDESTRUCTIVE TESTING TO VERIFY THE PROPERTIES OF 3D-PRINTED STEEL PLATES	
JANA VESELÁ A PAVEL MAREŠ	
ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI ENERGETICKÝCH A ZPRACOVATELSKÝCH ZAŘÍZENÍ POMOCÍ POKROČILÝCH POVLAKOVÝCH SYSTÉMŮ	33
INCREASING THE LIFETIME AND RELIABILITY OF POWER AND PROCESS EQUIPMENT USING ADVANCED COATING SYSTEMS	
JAKUB ANTOŠ	
MOBILNÍ PODPORA PRO DIAGNOSTIKU KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ ČEZ	35
MOBILE SUPPORT FOR DIAGNOSTICS OF CEZ ENERGY EQUIPMENT COMPONENTS	
PAVEL CVEŠPR	

POZNATKY Z EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU ÚNAVOVÉ PEVNOSTI A ŽIVOTNOSTI SVAŘENCŮ S APLIKACÍ VYSOKOFREKVENČNÍHO MECHANICKÉHO ZPEVNŮVÁNÍ.....	43
FINDINGS FROM EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FATIGUE STRENGTH AND LIFETIME OF WELDS WITH THE APPLICATION OF HIGH FREQUENCY MECHANICAL IMPACT	
MILOSLAV KEPKA JR. A MILOSLAV KEPKA	
ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ SVARŮ PAROVODŮ.....	49
ULTRASONIC TESTING OF STEAM PIPE WELDS	
PAVEL MAREŠ A JANA VESELÁ	
VLIV VRUBU NA CREEPOVOU ODOLNOST NIZKOLEGOVANÉ CR-MO-V OCELI (ČSN 15 128)	55
NOTCH EFFECT ON THE CREEP RESISTANCE OF LOW ALLOY CR-MO-V STEEL (ČSN 15 128)	
JIŘÍ DVOŘÁK, MARIE KVAPILOVÁ, PETR KRÁL, KVĚTA KUCHAROVÁ, MARIE OHANKOVÁ A VÁCLAV SKLENIČKA	
CREEPOVÉ CHOVÁNÍ SUPERSLITINY IN939 VYROBENÉ METODOU L-PBF	61
CREEP BEHAVIOUR OF SUPERALLOY IN939 PRODUCED BY L-PBF METHOD	
MARIE KVAPILOVÁ, IVO ŠULÁK, IVO KUBĚNA, JIŘÍ DVOŘÁK, PETR KRÁL A VÁCLAV SKLENIČKA	
HODNOCENÍ DEGRADACE OCELÍ 304H A HR3C POMOCÍ MALÝCH VZORKŮ	67
DEGRADATION EVALUATION OF 304H AND HR3C STEELS USING SMALL SAMPLES	
EVA CHVOSTOVÁ, PAVEL KONOPÍK, LUCIE PILSOVÁ A TOMÁŠ CHMELA	
POUŽITÍ SCREENINGOVÉ METODY PECT PŘI KONTROLE MEMBRÁNOVÝCH STĚN A JEJÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ..	71
APPLICATION OF THE PECT SCREENING METHOD IN MEMBRANE WALL INSPECTION AND ITS POSSIBLE APPLICATIONS	
JIŘÍ TOMAS	
AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE – VÝVOJ, AKTIVITY A PILOTNÍ JEDNOTKY.....	79
HEAT ENERGY ACCUMULATION – DEVELOPMENT, ACTIVITIES AND PILOT UNITS	
OTAKAR FRÝBORT A TOMÁŠ MELICHAR	
EVROPSKÝ PROJEKT OFFERR: PŘÍNOSY PROJEKTU PRO PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI JE V EU.....	81
EUROPEAN PROJECT OFFERR: PROJECT BENEFITS FOR EXTENDING THE LIFETIME OF THE NPPS IN THE EU	
JIŘÍ ŽDÁREK	
TESTOVÁNÍ A ANALÝZY BETONŮ A KAMENIVA Z HLEDISKA RADIAČNÍHO STÁRNUTÍ	87
TESTING AND ANALYSIS OF CONCRETE AND AGGREGATES FROM THE VIEWPOINT OF RADIATION AGING	
KAMIL SOBEK, ALICA FEDORIKOVÁ, JITKA KLAISNEROVÁ, PATRICIE HALODOVÁ, ONDŘEJ SRBA, KATEŘINA HRDLÍČKOVÁ A PETR ŠTEMBERK	
VÝVOJ POKROČILÝCH METOD HODNOCENÍ STAVU KOMPONENT	93
DEVELOPMENT OF METHODS OF ADVANCED COMPONENT CONDITION ASSESSMENT	
JAROSLAV BROM, JANA VESELÁ, PETR ŽIVNÝ A PAVEL ZAHŘÁDKA	
TEST ŠROUBŮ PŘI TĚŽKÝCH ZATÍŽENÍCH – MAZÁNÍ ŠROUBŮ	97
SCREW TEST UNDER HEAVY LOADS – SCREW LUBRICATION	
ANDREAS WESSELY A ZDENĚK NACHÁZEL	
ECOL LUBRICATION MANAGEMENT – OUTSOURCING MAZÁNÍ STROJŮ A ZAŘÍZENÍ V SOULADU S NOVÝM STANDARDEM ICML 55.1	103

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

TOMÁŠ KLÍMA

ROZBOR TRHLIN VE SVARECH KOTLOVÝCH TRUBEK Z OCELI T24 107

ANALYSIS OF CRACKS IN T24 STEEL BOILER TUBE WELDS

JOSEF KASL, DAVID AIŠMAN A RŮŽENA FIKRLOVÁ

SIMULACE ŽÍHÁNÍ SVARŮ MEMBRÁNOVÉ STĚNY KOTLE 115

SIMULATION OF BOILER MEMBRANE WALL ANNEALING

ONDŘEJ SKÁLA

LETECKÉ INSPEKCE V ENERGETICE 117

AERIAL INSPECTIONS FOR THE ENERGY INDUSTRY

FILIP SCHMIDT

PROFIL TRHLÍN (INDIKACÍ) TECHNIKOU TFM 119

CRACKS' PROFILE (INDICATIONS) BY USING TECHNIQUE TFM

DANIEL DOPJERA

JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ V PRAXI – VÝROBA HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ 125

NUCLEAR MAINTENANCE AND REPAIRS IN PRACTISE – MANUFACTURING OF DISSIMILAR METAL JOINTS

TOMÁŠ SOUKUP

MANIPULÁTORY A ROBOTICKÉ SYSTÉMY PRO JE A ENERGETIKU 131

MANIPULATORS AND ROBOTIC SYSTEMS FOR NPP AND POWER INDUSTRY

TOMÁŠ TROJAN

NEDESTRUKTIVNÍ ZKUŠEBNÍ TECHNIKY PRO KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ DEGRADACE TEPELNÉHO STÁRNUTÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ VVER 137

NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THERMAL AGING DEGRADATION OF INTERNAL COMPONENTS IN VVER

JOSEF STREJCIUS, ZDENĚK FULÍN A ZBYNĚK ŠPIRIT

PROGRAM ŘÍZENÉHO STÁRNUTÍ KOMODITNÍ 143

AGEING MANAGMENT PROGRAM – ADVANCED APPROACH

ONDŘEJ PLÍHAL A DAVID CVEŠPER

ŽIVOTNOST KOMPONENT DŮLEŽITÝCH PRO PŘECHODNÉ OBDOBÍ A PRO VYŘAZOVÁNÍ 147

LIFETIME OF COMPONENTS IMPORTANT FOR TRANSITION PERIOD AND FOR DECOMMISSIONING

FILIP RANDÁK A FRANTIŠEK HUPTYCH

INSPEKCE BEM™ NA POTRUBÍ CHLADÍCÍ VODY V ETE 153

BEM™ INSPECTION ON COOLING WATER STRUCTURE AT ETE

VOJTĚCH KŘÍŽ

VYSOKOHUSTOTNÍ PALIVA PRO JADERNÉ REAKTORY 159

HIGH DENSITY FUELS FOR NUCLEAR REACTORS

PETR ŠÁREK, JAKUB KREJČÍ, TOMÁŠ CHMELA A JITKA KABÁTOVÁ

VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ RADIAČNÍHO BOBTNÁNÍ VE VNITŘNÍCH ČÁSTECH REAKTORU VVER-1000 V RÁMCI MEZINÁRODNÍHO BENCHMARKU DELISA-LTO 165

COMPUTATIONAL ASSESSMENT OF RADIATION SWELLING IN THE INTERNAL PARTS OF THE VVER-1000 REACTOR WITHIN THE DELISA-LTO INTERNATIONAL BENCHMARK

VLADISLAV PIŠTORA A MATĚJ LISTÍK

LIMITY CHEMICKÝCH PARAMETRŮ V PRIMÁRNÍM OKRUHU JE – MOŽNOST JEJICH ÚPRAVY..... 167

CHEMICAL PARAMETERS OF THE PRIMARY WATER OF A NPP – THEIR LIMITS AND POSSIBLE ADJUSTMENT

PAVEL KŮS, MONIKA ŠÍPOVÁ A MICHAELA JOANIDISOVÁ

VÝSLEDEK NÁRODNÍHO PROJEKTU ZAMĚŘENÉHO NA TVORBU METODIKY HODNOCENÍ TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU PŘI TĚŽKÉ HAVÁRII..... 171

THE RESULT OF A NATIONAL PROJECT FOCUSED ON THE CREATION OF A METHODOLOGY FOR REACTOR PRESSURE VESSEL ASSESSMENT IN THE CASE OF A SEVERE ACCIDENT

PETR GÁL

INTERAKCE MATERIÁLU VNĚJŠÍHO PLÁŠTĚ UKLÁDACÍHO OBALOVÉHO SOUBORU VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA S BENTONITOVOU BARIÉROU V PODMÍNKÁCH HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ-PROJEKT EURAD CONCORD 173

INTERACTION OF THE OUTER SHELL MATERIAL OF THE WASTE DISPOSAL PACKAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL WITH THE BENTONITE BARRIER UNDER THE CONDITIONS OF A DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY – EURAD CONCORD PROJECT

ZBYNĚK VESELKA, ŠÁRKA ŠACHLOVÁ, DAVID DOBREV, VLASTISLAV KAŠPAR, PETR VEČERNÍK, MICHAELA MATULOVÁ, ZUZANA VÁVROVCOVÁ, PETR BRABEC, MIROSLAV KRPEC, ADAM URBÁNEK A MICHAELA JOANIDISOVÁ

OZAŘOVACÍ EXPERIMENTY KONSTRUKČNÍCH OCELÍ NA LVR-15 179

IRRADIATION EXPERIMENTS OF STRUCTURAL STEELS IN LVR-15

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

HODNOCENÍ VLIVU TEPELNÉHO STÁRNUTÍ NA MATERIÁLECH PRIMÁRNÍHO OKRUHU EBO-V1 V RÁMCI PROJEKTU DELISA-LTO 185

EVALUATION OF THE EFFECT OF THERMAL AGEING ON EBO-V1 PRIMARY CIRCUIT MATERIALS IN THE DELISA-LTO PROJECT

PETRA KLATOVSKÁ, IVANA SCHNABLOVÁ, RADIM KOPŘIVA, VERONIKA KOZÁKOVÁ, ZDENĚK FENCL A PETRA GÁVELOVÁ

POROVNÁNÍ DVOU METOD IN-SITU TAHOVÝCH ZKOUŠEK SIMULUJÍCÍCH VODÍKOVÉ ZKŘEHNUTÍ OCELI 42CRMO4 191

COMPARISON OF TWO METHODS OF IN-SITU TENSILE TESTS SIMULATING HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF 42CRMO4 STEEL

PAVEL KONOPÍK A JAN ZMEKO

REJSTŘÍK AUTORŮ..... 196

VLIV VODÍKU NA CREEPOVOU ODOLNOST ZIRKONIOVÉHO POKRYTÍ JADERNÉHO PALIVA PŘI PROVOZNÍ TEPLITĚ REAKTORU

THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE CREEP RESISTANCE OF ZIRCONIUM NUCLEAR FUEL CLADDING TUBES AT TEMPERATURE OF REACTOR OPERATION

Václav Sklenička ^{a)}, Květa Kuchařová ^{a)}, Petr Král ^{a)}, Marie Kvapilová ^{a)}, Jiří Dvořák ^{a)}, Věra Vrtílková ^{b)} a Jakub Krejčí ^{b)}

^{a)} Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., Žižkova 22, 616 00 Brno

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

Abstrakt

Príspevek je zaměřen na výzkum vlivu vodíku na creepovou odolnost zirkoniové slitiny Zr1%Nb povlakových tyčí jaderného paliva, určených pro vodou chlazené reaktory typu VVER. Segmenty vyřezané z povlakových tyčí byly použity jako tubulární creepové vzorky. Část creepových vzorků byla podrobena předhydridaci na úroveň koncentrace vodíku v rozmezí 371–656 wppm H. Komparativní creepové zkoušky při konstantním napětí byly provedeny při teplotě 350 °C a tahovém napětí 150–225 MPa na vzorcích ve výchozím stavu a po modelové hydridaci. Bylo zjištěno, že koncentrace $c_H \leq 400$ wppm vede ke zrychlení creepové deformace, a tudíž k degradaci creepové odolnosti. Naopak, vyšší koncentrace vodíku vede ke snížení rychlosti creepové deformace a zvýšení creepové odolnosti. Rozdílný vliv H na creepové chování byl připsán přítomnosti atomárního vodíku a vodíku ve formě hydridů zirkonia.

Abstract

The paper includes the investigation of the effect of hydrogen on the creep resistance of Zr1%Nb alloy fuel cladding tubes for use in light water-cooled nuclear reactor of VVER-type reactor. The tubular creep specimens were machined directly from the cladding tube sections. Creep tests were carried out concurrently for both the as-received state and the pre-hydrided state of zirconium alloy. These comparative creep tests were performed at 350 °C, under constant stress 150-225 MPa, on both non-hydrided specimens and hydride specimens with a hydrogen concentration in the range 371-656 wppm H. It was observed, that the concentration $c_H \leq 400$ wppm resulted in an increase of the creep rate and a deterioration of the resistance. By contrast, a higher concentration of H caused a decrease in the creep rate. The difference in the effect of hydrogen on the creep behaviour was explained by the different roles of hydrogen in solid solution and in the form of zirconium hydride precipitates.

Úvod

Během komplexního provozního namáhání palivového pokrytí v reaktoru dochází k degradaci výchozích vlastností zirkoniových slitin působením řady procesů poškozování, jako jsou strukturní nestabilita slitin, radiace, oxidace/koroze či hydridace a časově závislé deformační procesy např. cyklická mechanická únava, plastická deformace tečením (creepem), či interakce creepu s únavou. Z uvedených degradačních procesů jsou mechanismy creepové deformace a porušování často považovány za kritické faktory, ovlivňující životnost pokrytí [1-3].

Ačkoliv výzkumu vlivu vodíku v zirkoniových slitinách byla věnována značná pozornost (pro přehled viz [4]), velmi omezené množství veřejně publikovaných prací o působení vodíku při creepu těchto slitin v reaktoru či v podmínkách mimo reaktor (bazény výměny a skladování paliva) poskytlo značně protichůdné výsledky a závěry [1,4-8]. Většina experimentálních prací byla provedena na zirkoniových slitinách na bázi Zr-Sn západní provenience (Zircaloy-2

a zejména Zircaloy-4). V tomto příspěvku se zaměříme na vliv vodíku při tepelném creepu palivového pokrytí vyrobeného ze slitiny Zr1%Nb za teploty 350 °C, která je blízká provozní teplotě vodou chlazených reaktorů typu VVER. Cílem tohoto příspěvku je posoudit, zda v důsledku přítomnosti vodíku dochází ke změně působících creepových deformačních mechanismů a ke změně creepové odolnosti zkoumané slitiny. Krátkodobé creepové zkoušky v tahu byly provedeny přímo na předhydridovaných segmentech palivového pokrytí.

Experimentální část

Palivové pokrytí, vyrobené ze slitiny Zr1hm.%Nb, bylo získáno v rekrystalizovaném strukturním stavu slitiny. Z trubkového pokrytí byly vyřezány segmenty, ze kterých byly vyrobeny trubkové creepové vzorky o měrné délce 50 mm s vnějším průměrem 9,13 mm. Jejich podélná osa byla rovnoběžná s osou trubky a osou působícího tahového napětí při creepu. Komparační creepové zkoušky realizované v ÚFM AV ČR v.v.i. [9] byly provedeny v tahu při konstantním aplikovaném napětí v atmosféře čistěného a sušeného argonu na creepových vzorcích ve výchozím (dodaném) stavu zirkoniové slitiny (v dalších vzorky označeny AR) či ve stavu po laboratorní předhydridaci (označení vzorků PH). Vlastní předhydridace na úroveň koncentrace vodíku v rozmezí 371-656 wppm byla provedena v UJP PRAHA a.s. v autoklávu v atmosféře vodíku a argonu [10]. Vzorky ve výchozím stavu (AR) obsahovaly pouze cca 4 wppm H.

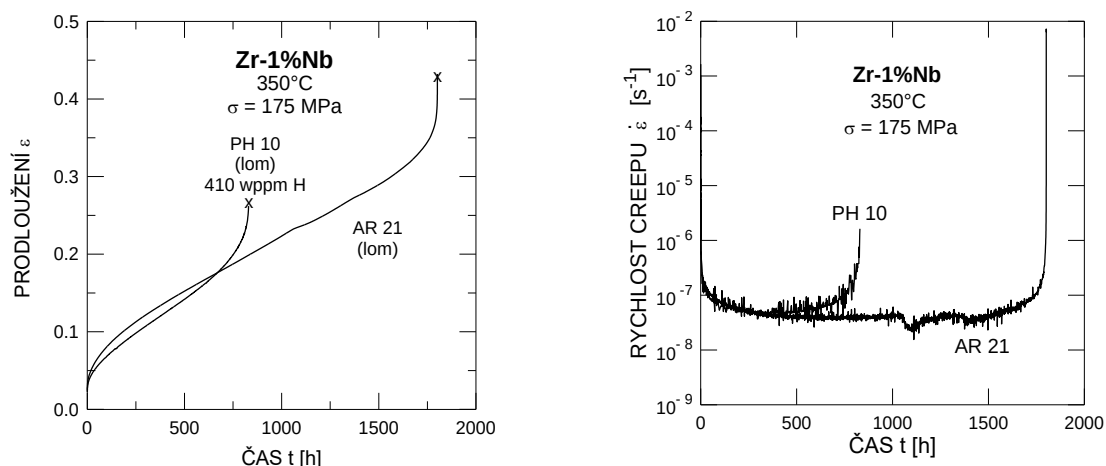
Creepová zkušební teplota 350 °C se pohybovala v rozmezí ± 0.5 °C podél celé měrné délky vzorku. Creepové prodloužení ε bylo snímáno indukčním snímačem Hottinger-Baldwin Co. (W10K) s citlivostí 5×10^{-6} a průběžně digitálně registrováno v průběhu celé creepové zkoušky a následně počítačově vyhodnoceno. Z technických důvodů bylo možno vést creepové zkoušky v režimu konstantního aplikovaného napětí σ až do dosažení creepového prodloužení $\varepsilon \leq 0,40$. Vedle creepových zkoušek probíhal mikrostrukturní rozbor exponovaných AR i PH vzorků pomocí světelné a elektronové SEM a TEM mikroskopie.

Výsledky

Soubor creepových zkoušek AR a PH vzorků, provedených při teplotě 350 °C, zahrnoval rozmezí aplikovaného tahového napětí 150 až 225 MPa. V některých případech, z důvodu časového omezení řešení relevantního grantového projektu a limitované kapacity creepové laboratoře, nebyly creepové zkoušky vedeny až do lomu a byly v průběhu expozice přerušeny. Doby expozic t vzorků AR v závislosti na napětí se pohybovaly v intervalu 16 až 6500 hodin, v případě vzorků PH expoziční interval představoval 120 až 7 797 (přerušená zkouška) hodin.

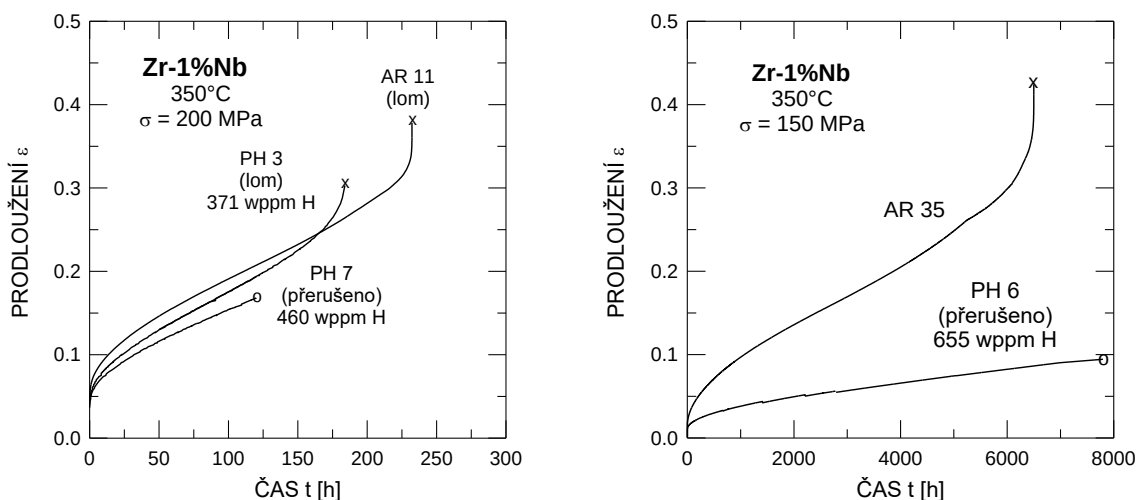
Pro posouzení vlivu vodíku na creepové chování zvolené zirkoniové slitiny je vhodné vzájemně porovnat časové závislosti creepového prodloužení (creepové křivky) a napěťové závislosti minimálních rychlostí creepu $\dot{\varepsilon}_m$ creepových vzorků AR a PH.

Porovnání standardních creepových křivek (ε vs. t) a z nich odvozených modifikovaných creepových křivek ($\dot{\varepsilon}_m$ vs. t [9]) vzorků AR a PH, které byly vedeny při stejném napětí 175 MPa až do lomu, umožňuje obr. 1(a),(b). Modifikované verze standardních creepových křivek (obr. 1(b)) umožňují na rozdíl od standardních křivek (obr. 1(a)) zřetelné určení jednotlivých stadií creepu (primární, stacionární a terciární) a především i rigorózní stanovení kritické charakteristiky – stacionární či minimální rychlosti creepu. Zejména důležité je vymezení oblasti primárního creepu, ve které dochází k spojitému poklesu rychlosti creepu v důsledku dislokačního zpevnění slitiny. Jak je patrné z obr. 1(b), je primární stadium pro předhydridovaný vzorek PH10 (410 wppm H) podstatně kratší než v případě vzorku AR 21. Je vhodné poznamenat, že tento výsledek by bylo možno jen obtížně získat pomocí standardní creepové křivky (obr. 1(a)). Bezprostředním důsledkem kratšího primárního stadia je kratší doba do lomu vzorku PH10 ve srovnání se vzorkem AR21 (obr. 1(a) a (b)), neboť průběh urychleného terciárního stadia creepu před lomem obou vzorků se výrazně neliší.



Obr. 1: Creepové křivky pro vzorek AR21 ve výchozím stavu a předhydridovaný vzorek PH10: a) standardní creepové křivky, b) modifikované creepové křivky

Výsledek, vyplývající z obr. 1, svědčící o urychlení creepové deformace, bylo třeba ověřit pro další vzorky s nižší úrovní předhydridace jak demonstruje obr. 2(a). Zatímco nejnižší koncentrace vodíku (vzorek PH3, 371 wppm H) vede k podobným závěrům jako obr. 1(a), předhydridovaný vzorek PH7 s koncentrací vodíku 460 wppm již vykazuje poněkud nižší rychlost creepové deformace než nehydridovaný vzorek AR11 (vzorek PH 7 byl přerušen při dosažení minimální rychlosti creepu). Tendence výrazného snížení rychlosti creepu se vzrůstem koncentrace vodíku je patrná z obr. 2(b), kdy vzorek PH6 s nejvyšší koncentrací vodíku 655 wppm H, přerušený po extrémně dlouhodobé expozici, vykazuje blízké dosažení minimální rychlosti creepu poté, co již u vzorku AR 35 ve výchozím stavu došlo již k lomu (obr. 3).



Obr. 2: Porovnání creepových křivek vzorků výchozího stavu s předhydridovanými vzorky s rozdílnou koncentrací vodíku: a) vzorky PH 3 a PH 7 s nižší koncentrací vodíku, b) vzorek PH 6 s nejvyšší koncentrací vodíku

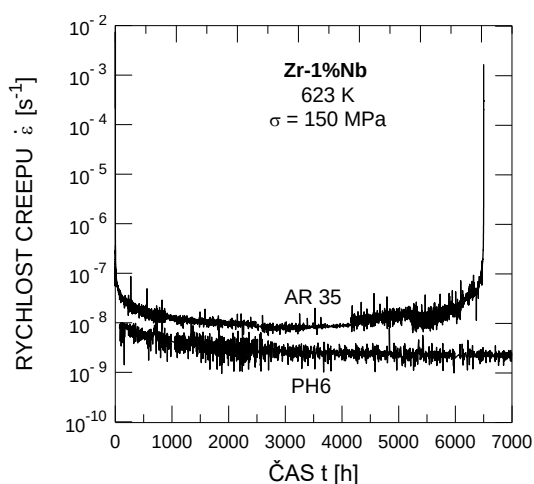
Vzniká přirozeně otázka, zda pozorované rozdílné chování předhydridovaných vzorků oproti vzorkům výchozího stavu není způsobeno rozdílnými působícími mechanismy creepu. Obecně je rychlost creepové deformace $\dot{\epsilon}$ v závislosti na napětí σ a teplotě T popisována empirickým vztahem [1,9]

$$\dot{\epsilon} = A (\sigma)^n \exp (-Q_C / RT), \quad (1)$$

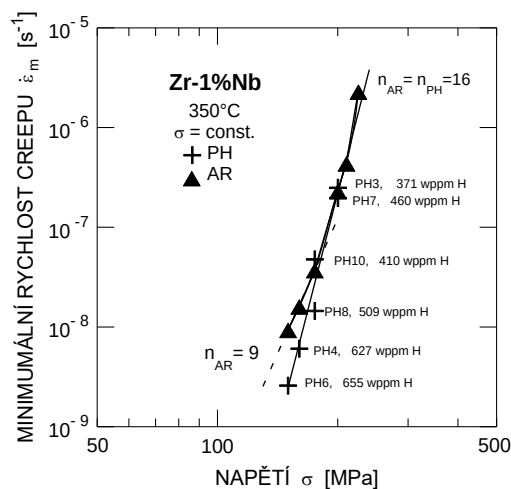
kde napěťový exponent rychlosti creepu n

$$n = (\partial \ln \dot{\epsilon}_m / \partial \ln \sigma)_T. \quad (2)$$

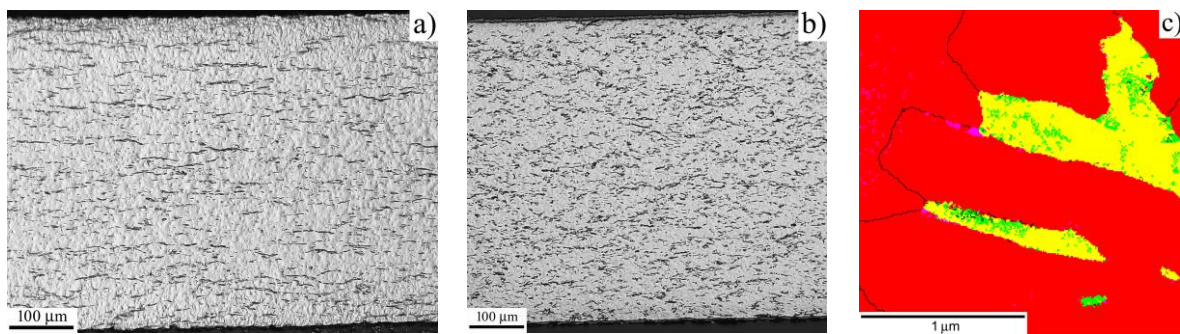
V uvedených vztazích je A materiálová konstanta, Q_C aktivační energie creepu a R je plynová konstanta. Při aktivační analýze creepových dat a identifikaci působících mechanismů se vychází z creepových parametrů n a Q_C . Vzhledem k tomu, že creepové testy byly provedeny při jedné zkušební teplotě, využijeme v dalším znalost jen napětového exponentu creepové rychlosti n . Napětová závislost minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ je vynesena na obr. 4 a směrnice k proloženým experimentálním údajům jsou hodnoty napětových exponentů n . Je patrné, že napětová závislost $\dot{\epsilon}_m(\sigma)$ nemusí být v sledovaném intervalu aplikovaného napětí u vzorků výchozího stavu lineární [9], tak, jak je tomu u předhydridovaných vzorků. Zatímco v oblasti nejvyšších napětí lze přijmout společnou hodnotu $n = 16$, u vzorků výchozího stavu dochází při napětích ≤ 200 MPa k odklonu od společného lineárního průběhu a v této napětové oblasti lze přijmout pro vzorky AR hodnotu $n = 9$. K identifikaci působících creepových mechanismů včetně vlivu vodíku se vrátíme v závěrečné diskuzi.



Obr. 3: Modifikovaná creepové křivky pro vzorek ve výchozím stavu AR 35 a hydridovaném stavu PH 6



Obr. 4: Napětová závislost minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ pro výchozí stav (AR) a předhydridovaný stav (PH) vzorků



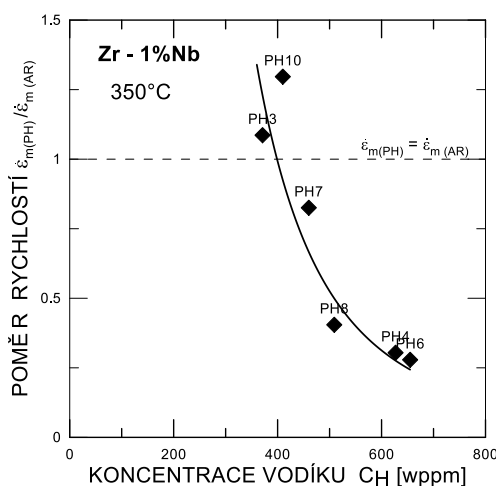
Obr. 5: Mikrosnímky hydridů v podélných výbrusech předhydridovaných vzorků: a) vzorek PH 3, 200 MPa, 371 wppm H, b) vzorek PH 6, 150 MPa, 655 wppm H, c) PH6, metoda EBSD, δ -hydrid zirkonia (žlutý), uvnitř γ -hydrid zirkonia (zelený)

Rozsáhlý kvalitativní i kvantitativní mikrostrukturní rozbor vzorků AR i PH před a po creepové expozici byl proveden v dřívější publikaci [10]. Vzhledem k tomu, že rozpustnost vodíku v tuhém roztoku při teplotě 350 °C je uvažována kolem 200 wppm, lze očekávat přítomnost vodíku u předhydridovaných vzorků ve formě atomárního vodíku tak – zejména při vyšších koncentracích – ve formě hydridů δ (dominantní) a γ zirkonia (obr. 5).

Závěrečná diskuse

Dříve než budeme diskutovat experimentálně zjištěný vliv vodíku na chování při vysoko-teplotním creepu slitiny Zr1%Nb vraťme se ještě k napětové závislosti minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ (obr. 4). Vysoká hodnota $n = 16$ odpovídá mocninovému dislokačnímu creepu precipitačně zpevněných slitin v oblasti velmi vysokých napětí (v literatuře je tato oblast označována jako tzv. „power-law breakdown“). Slitina Zr1%Nb je ve výchozím stavu zpevněna niobem v tuhém roztoku, ale i precipitáty sekundárních fází, především β -Nb částicemi. Při vyšších koncentracích vodíku k precipitačnímu zpevnění přispívají i hydridy zirkonia. Při poklesu hodnot aplikovaného napětí dochází u vzorků AR k poklesu hodnoty exponentu $n = 9$, kde příslušným deformačním mechanismem je mocninový (dislokační) creep, realizovaný skluzem a šplhem mobilních dislokací. Důležitou informací vzhledem k modelům predikce životnosti hydridovaných vzorků je skutečnost, že i v této oblasti napětí si prehydridované vzorky zachovávají lineární závislost s exponentem $n = 16$ s rychlostmi creepu podstatně nižšími, než vykazují vzorky AR (obr. 4). Další výzkum chování předhydridovaných vzorků by vyžadoval extrémně dlouhodobé creepové expozice při velmi nízkých napětích, což nelze provést v trvání běžného grantového projektu. Nicméně, zřejmě přítomnost vodíku nevede ke kvalitativním změnám deformačních mechanismů creepu.

Bezprostřední informaci o vlivu vodíku na creepové chování zkoumané slitiny může poskytnout porovnání hodnot minimální rychlosti creepu předhydridovaných a nehydridovaných vzorků, tj. poměr $\dot{\epsilon}_m(PH) / \dot{\epsilon}_m(AR)$, creepově testovaných při stejné hodnotě aplikovaného napětí – obr. 6. Z obr. 6 je zřejmé, že při koncentraci vodíku $C_H \leq 400$ wppm je rychlost vzorků PH vyšší než vzorků AR, poměr $\dot{\epsilon}_m(PH) / \dot{\epsilon}_m(AR) \geq 1$. Naopak, s dalším růstem hodnot koncentrace vodíku dochází ke dramatickému snížení rychlosti předhydridovaných vzorků PH oproti vzorkům výchozího stavu.



Obr. 6: Závislost poměru minimálních rychlostí creepu $\dot{\epsilon}_m(PH) / \dot{\epsilon}_m(AR)$ při stejné hodnotě napětí σ na koncentraci vodíku C_H

V současnosti jednoznačná fyzikálně metalurgická interpretace popsáných výsledků chybí. Provizorně lze přijmout, že urychlení creepové deformace atomárním vodíkem rozpuštěným v tuhém roztoku je spojeno s redukcí energie vrstevných chyb zirkonia způsobené difúzí vodíku k jádrům šroubových dislokací a se zvýšením jejich mobility. Naopak, přítomnost hydridů zvyšuje pevnost matrice v důsledku interakce mobilních dislokací s hydridy zirkonia a tím vede ke snížení rychlosti creepové deformace.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TN02000018 NCK Strojírenství.

Literatura

- [1] MURTY, K.L. - GOLLAPUDI, S. - RAMASWAMY, K. - MATHEW, M.D. Creep deformation of materials in light water reactors (LWRs), In: *Materials ageing and degradation in light water reactors*. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2013, 81-148. ISBN 978-0-85709-239-7.
- [2] TURQUE, I., CHOSSON, R., LE SAUX, M., BRACHET, J.-C., VANDENBERGHE, V., CREPIN, J., GOURGUES-LORENZON, A.F. Mechanical behavior at high temperature of highly oxygen- or hydrogen-enriched α and (prior-) β phases of zirconium alloys. In: *18th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry*. Hilton Head, United States, May 2016, paper cea-02442337.
- [3] SKLENICKA, V. - KUCHAROVA, K. - KRAL, P. - DVORAK, J. - KVAPILOVA, M. - VRTILKOVA, V. - KREJCI, J. Investigation of the thermal creep behaviour of non-irradiated Zr1%Nb cladding alloys between 623 and 1223 K. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, vol. 583, paper 154518, doi: 10.1016/j.jnucmat.2023.154518
- [4] MOTTA, A.T. - CAPOLUNGO, L. - CHEN, L.-Q. - CINBIZ, M.D. - DAYMOND, M.R. - KOSS, D.A. - LACROIX, E. - PASTORE, G. - SIMON, P.-C. A. - TONKS, M.R. - WIRTH, B.D. - ZIKRY, M.A. Hydrogen in zirconium alloys: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 518, p. 440-460, doi: 10.1016/j.jnucmat.2019.02.042
- [5] KISHORE, R. Effect of hydrogen on the creep behavior of Zr-2.5%Nb alloy at 723 K. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, vol. 385, p. 591-594, doi: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.034.
- [6] SARKAR, A. - BOOPATHY, K. - EAPEN, J. - MURTY, K.L. Creep behavior of hydrogenated zirconium alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, p. 3649-3656, doi: 10.1007/s11665-014-1129-y
- [7] SUMAN, S. - KHAN, M.K. - PATHAK, M. - SINGH, R.N. Effect of hydrogen on thermal creep behaviour of Zircaloy fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 498, p. 20-32, doi: 10.1016/j.jnucmat. 2017.10.015
- [8] OMBIAH, B. - SARKAR, A. - MURTY, K.L. Effect of hydriding on the creep behavior HANA-4 zirconium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 767, paper 138435, doi: 10.1016/j.msea:2019:138435
- [9] SKLENICKA, Václav, KUCHAROVÁ, Květa, KLOC, Luboš, DVOŘÁK, Jiří, KRÁL, Petr, KVAPILOVÁ, Marie, VRTÍLKOVÁ, Věra a KREJČÍ, Jakub. Creepové zkoušky zirkoniových Povlakových tyčí jaderného paliva a jejich interpretace. In: *18. konference Životnost komponent energetických zařízení*, Srní: Západočeská univerzita v Plzni, říjen 2023, p. 151-156. ISBN 978-80-261-1175-7.
- [10] KREJČÍ, J. - KABÁTOVÁ, J. - KOČÍ, J. - WEISHAUPTOVÁ, Z. - VRTÍLKOVÁ, V. Hydrogen charging of fuel cladding methodology. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2016, vol. 4, p. 38-42, doi:10.14311/APOD:2016:4:0038
- [11] SKLENICKA, V. - KUCHAROVA, K. - KRAL, P. - DVORAK, J. - KVAPILOVA, M. - VRTILKOVA, V. - KREJCI, J. Thermal creep in a pre-hydrided Zr1%Nb nuclear fuel cladding tube. *Journal of Nuclear Materials*, 2024, vol. 596, paper 155084, doi: 10.1016/j.jnucmat.2024.155084

DEGRADACE PLYNÁRENSKÉ OCELI VLIVEM ELEKTROLYTICKÉHO VODÍKOVÁNÍ

DEGRADATION OF GAS STEEL DUE TO ELECTROLYTIC HYDROGENATION

Hana Jirková, Josef Duliškovič, David Aišman a Josef Kasl

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

Abstrakt

Spalováním fosilních paliv se do atmosféry uvolňují skleníkové plyny, dochází ke globálnímu oteplování a změnám stavu klimatu. Snížení klimatických dopadů je možné docílit přechodem na bezuhlíkové zdroje energie a vodík jako bezuhlíkový nosič energie může být klíčovým parametrem. Velmi diskutovanou možností je využití směsi zemního plynu a vodíku. Využití této směsi v průmyslu, např. jako palivo plynových elektráren, by vedlo k nižší zátěži životního prostředí díky snížení emisí skleníkových plynů. Důležitá je efektivní a ekonomicky přijatelná distribuce vodíku. Nejlepší možnost představuje doprava plynu pomocí stávajících potrubních systémů. Vodík zhoršuje mechanické vlastnosti většiny konstrukčních kovových materiálů, především ocelí. Popsání degradace materiálů vystavených vodíkovému prostředí představuje klíčový parametr pro použití stávající transportní infrastruktury pro přenos zemního plynu.

Pro experiment byla použita ocel X52, která je základním materiálem pro rozvodnou síť zemního plynu. Pro sycení materiálu vodíkem bylo použito elektrolytické vodíkování. Byla odzkoušena různá doba sycení. Mechanické vlastnosti byla stanoveny zkouškou rázem v ohybu.

Abstract

By burning fossil fuels, greenhouse gases are released into the atmosphere, causing global warming and climate change. The reduction of climate impacts can be achieved by switching to carbon-free energy sources, and hydrogen as a carbon-free energy carrier can be a key parameter. A highly discussed option is the use of a mixture of natural gas and hydrogen. The use of this mixture in industry, e.g. as a fuel for gas-fired power plants, would lead to a lower burden on the environment due to the reduction of greenhouse gas emissions. Efficient and economically acceptable distribution of hydrogen is important. The best option is to transport gas using existing pipeline systems. Hydrogen deteriorates the mechanical properties of most structural metal materials, especially steel. Describing the degradation of materials exposed to a hydrogen environment is a key parameter for the use of existing transportation infrastructure for natural gas transmission.

X52 steel, which is the basic material for the natural gas distribution network, was used for the experiment. Electrolytic hydrogenation was used to saturate the material with hydrogen. Different carburization times were tested. The mechanical properties were determined by a bending impact test.

Úvod

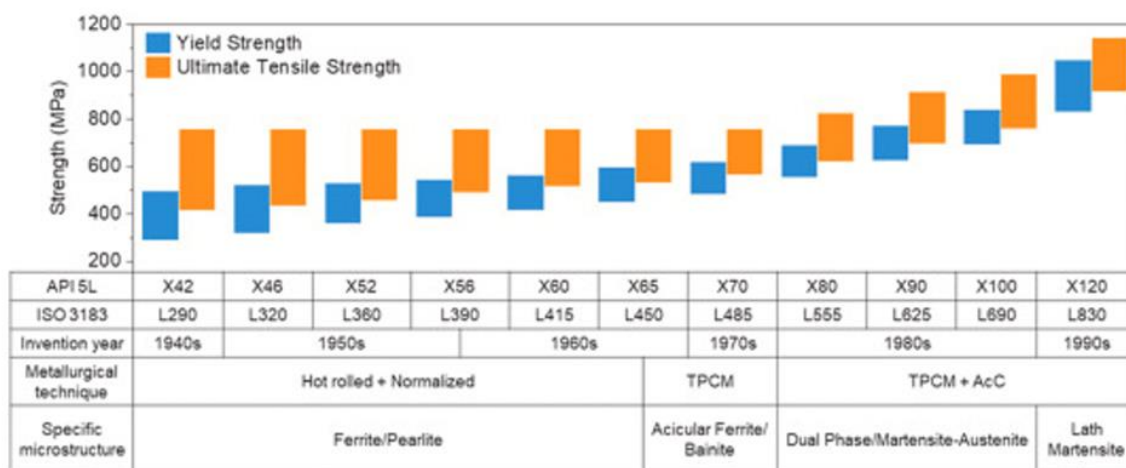
Současný trend snižování emisí CO₂ výrazně rozšířil oblast zájmu v oblasti výroby, skladování, transportu a využití vodíku. Jedná se zejména o oblast dopravy a energetiky. Velmi diskutovanou možností je využití směsi zemního plynu a vodíku. Hlavní složkou zemního plynu je metan, který je velmi agresivním skleníkovým plynem. Jednou z možností, jak jeho spotřebu omezit, je využití vodíku, nebo ještě lépe tzv. „zeleného“ vodíku, který je k životnímu prostředí výrazně šetrnější. Jednou z důležitých otázek využití směsi zemního plynu a vodíku, tzv.

blendu, je jeho přeprava k finálnímu spotřebiteli. V současné době se předpokládá použití stávajících potrubních systémů pro transport zemního plynu. Vodík působí negativně na mechanické vlastnosti ocelí, dochází tzv. vodíkové křehkosti (HE – hydrogen embrittlement). Vodík může způsobit výraznou ztrátu tažnosti, zejména v přítomnosti koncentrátorů napětí [1]. Kromě toho vodík potenciálně zvyšuje rychlost růstu existujících trhlin při cyklickém tlakovém zatížení, zhoršuje lomovou houževnatost a v nadměrném množství vede ke vzniku vodíkem indukovaných trhlin [2-4]. To vše vede ke zkrácení životnosti plynovodu ve srovnání s provozem na zemní plyn. Vodíková křehkost závisí na mnoha parametrech, jako je typ materiálu, jeho zpracování, ale také na historii materiálu. Závisí také na množství vodíku ve směsi se zemním plynem a na tlaku. Vzhledem k délce potrubí je nutné použít ekonomicky nenáročné materiály [5].

V dnešních potrubních ocelích existují dvě hlavní mikrostruktury (Obr. 1). Většina potrubářských ocelí se používá za tepla nebo v normalizovaném stavu. To znamená, že jejich mikrostruktura je tvořena směsí perlitu a feritu u trubkových ocelí nižších tříd ($\leq$ API 5L X70). Oceli pro potrubí s minimální mezí kluzu 483 MPa (API 5L X70 a vyšší) se obvykle skládají z mikrostruktury ferit/bainit nebo ferit/acikulární ferit. Mohou být přítomny i malé objemové podíly precipitátů na bázi mikrolegur a ostrůvky martenzitu/austenitu [6]. Angus (2014) [7] zjistil, že oceli s mikrostrukturou acikulárního feritu vykazují vyšší difúzní koncentrace vodíku než oceli s mikrostrukturou feritu/perlitu, což je činí citlivějšími k degradaci vyvolané vodíkem.

Většinou se používají středně pevnostní potrubní oceli. Patří mezi ně například oceli API 5 L X42, X46 a X52, které pracují při tlaku až 13 MPa. Pro vyšší vodíkové tlaky jsou používány oceli API 5 L X60, X70 a X80 [5,8-10]. V České republice jsou často používány oceli ČSN 41 3030 nebo ČSN 41 1373.

Oceli používané pro potrubí mají většinou kubickou prostorově středěnou mřížku a intersticiálně rozpuštěný vodík se v těchto mřížkách vyskytuje v tetraedrických intersticiálních místech (T-místo) [11]. To je v kontrastu se slitinami s kubickou plošně středěnou mřížkou (FCC), kde rozpuštěný vodík preferuje oktaedrická intersticiální místa (O-site). Tento rozdíl v intersticiálním místě rozpuštěné látky mezi BCC a FCC mřížkou vede k vyšší difuzivitě vodíku v BCC než v FCC, protože mezi nejbližšími T-místy BCC je kratší difúzní vzdálenost než v případě O-míst FCC [11].



Obr. 1: Vývoj pevnosti, tepelného zpracování a mikrostruktury ocelí používaných pro potrubí [6]

Sycení vzorků vodíkem. V laboratorních podmínkách lze vzorky nasytit dvěma různými metodami, a to elektrochemicky obvykle při pokojové teplotě nebo nasycením plynou vodíkovou fází [12]. Jednodušší metodou je elektrochemické nabíjení vzorků vodíkem, které lze

snadno a efektivně realizovat v laboratoři. Je však třeba vzít v úvahu její odlišnosti od nabíjení v plynném prostředí.

Katodická hydrogenace je stabilní metoda, při níž jsou atomy vodíku rychle dodávány na povrch kovu, a vodík je homogenně rozložen. Velkou výhodou této metody je velká variabilita zkušebních parametrů. Je možné měnit typy elektrolytů, proudové hustoty, doby nasycení a teploty a měnit zkušební tělesa v průběhu experimentu. Hlavní nevýhodou této metody je silné nasycení povrchu vzorku vodíkem, které způsobuje vysoký koncentrační gradient směrem dovnitř zkušební tělesa. Tento gradient vytváří napětí, které může způsobit ztuhnutí materiálu, což ovlivní výsledky mechanických zkoušek [13]. Dalším negativem je rychlé uvolňování zachyceného vodíku. Pro správné vyhodnocení mechanických vlastností zkoušených materiálů je pak nutné provést zkoušku co nejdříve po ukončení elektrochemického nabíjení. Proto se velmi často zkoumá otázka rychlosti uvolňování vodíku ze vzorku nebo metody, kterými se vodík ve vzorku před měřením zadržuje.

Experimentální program

Pro bezpečný přechod na směs zemního plynu a vodíku je nutné odzkoušet změnu mechanických vlastností potrubních ocelí po jejich vystavení vodíkovému prostředí. Proto byl experimentální program zaměřen na popis změny mechanických vlastností oceli X52 po elektrolytickém sycení vzorků vodíkem.

Experimentální materiál. Pro experiment byla zvolena ocel X52, která je jednou z nejčastěji používaných pro výrobu přepravního potrubí na ropovody a plynovody. Dle specifikace API 5L a ISO 3183 se jedná o materiál střední třídy. Jedná se o ocel bez speciálních legujících prvků s 0,2 % C, 0,17 % Si a 1,38 % Mn (Tab. 1).

Materiál byl dodán ve stavu svařované trubky o průměru 219 mm a tloušťkou stěny 10 mm. Mikrostruktura dodaného stavu byla hodnocena v podélném i příčném směru. Mechanické vlastnosti byly stanoveny zkouškou rázem v ohybu na tělesech o průřezu 10×5 mm a délce 55 mm. Zkouška tahem byla provedena dle ČSN EN ISO 6892-1 na tělesech o průměru 6 mm. Struktura byla v podélném i příčném řezu feriticko-perlitická (Obr. 2 a Obr. 3). Perlit byl v lamelární morfologii. Hodnota vrubové houževnatosti byla 94 J. Mez pevnosti dosahovala 618 MPa, mez kluzu 516 MPa, tažnost byla 28 %.

Tab. 1: Chemické složení oceli X52 (hm. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb
0,15	0,17	1,37	0,013	0,003	0,06	0,03	0,01	0,001	0,03

Katodické vodíkování. Jedná se o metodu elektrolytického sycení vzorků, při které je zkušební těleso zapojeno jako katoda a anoda je vyrobena z platiny nebo korozivzdorné oceli. Stejným proudem, který je přiveden do elektrolytu vede k jeho rozkladu a vzniku vodíkových iontů – protonů. Jako elektrolyt se nejčastěji používá zředěný roztok H_2SO_4 v H_2O nebo roztoky metanolu s H_2SO_4 a NaOH spolu s inhibitory vodíku $NaAsO_2$, AsO_2 [14].

Rozdíl potenciálů vytvořený zdrojem způsobí, že se kladné vodíkové ionty přesunou z elektrolytu na zkušební těleso, tj. katodu (záporně nabitou elektrodu přitahující kladný náboj). Tento tok nabitých částic způsobí, že se na povrchu zkušební vzorku vytvoří vrstva vodíku. Stejně jako při každém jiném procesu se entropie systému zvyšuje a projevuje se difuzí, tj. samovolným pronikáním vodíku do struktury kovu. Rychlost difúze je ovlivněna teplotou a koncentrací vodíku na samotném povrchu.

Katodické vodíkování představuje stabilní metodu, protože dochází k rychlému přívodu atomů vodíku na povrch kovu a zanechává homogenní rozložení koncentrace vodíku. Velkou výhodou této metody je velká variace zkušebních parametrů. Během experimentu je možné měnit typy elektrolytů, proudové hustoty, doby vodíkování, teplota vodíkování i různě upravovat zkušební tělesa [15].

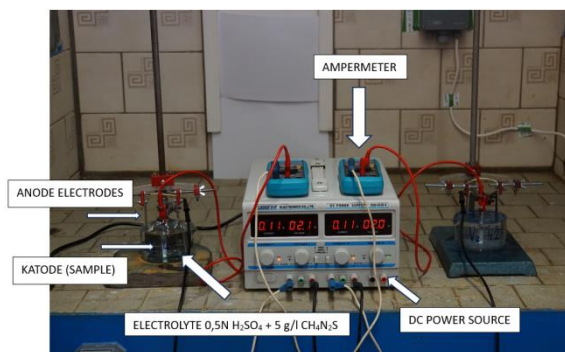
Pro zkoušky vodíkování byl jako zdroj proudu použit dvojitý laboratorní zdroj RXN-605D-II 2x60 V/5 A (Obr. 2). Elektrody byly vyrobeny z austenitické oceli 1.4541. Pro dodržení přesných parametrů experimentu byla definována i vzdálenost mezi anodou a katodou, která byla 30 mm.

Pro definování přesné plochy vodíkování, byly vzorky oblepeny silikonovou lepicí páskou. Proudová hustota byla vypočítána pomocí vzorce (1):

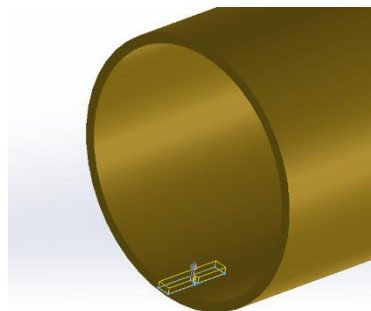
$$J = I/S \quad (1)$$

kde J – proudová hustota [mA/cm^2], I – elektrický proud [A], S – plocha syceného povrchu [cm^2].

Vzorky pro zkoušku rázem v ohybu o rozměrech $5 \times 10 \times 55$ mm byly vyráběny ze stěny trubky v podélném směru (Obr. 5). Pro experiment byl zvolen elektrolyt $0,5\text{N H}_2\text{SO}_4 + 5 \text{ g/l CH}_4\text{N}_2\text{S}$, proudová hustota $0,015 \text{ A}/\text{cm}^2$. Byly zkoušeny různé doby sycení od 1 h až po 47 h. Vzorky byly po vyndání z elektrolytu opláchnuty lihem a do 20 minut byl provedena zkouška rázem v ohybu.



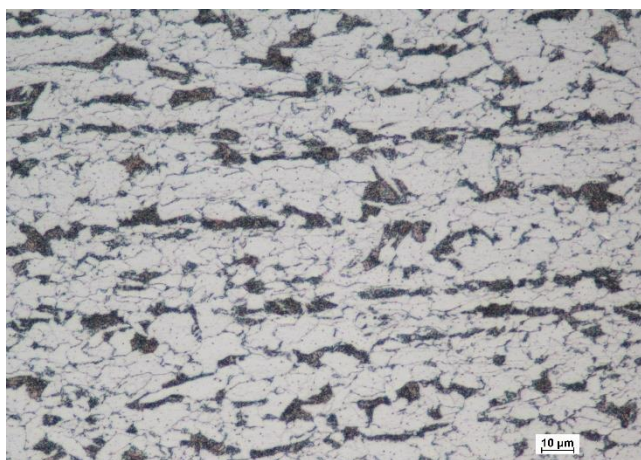
Obr. 2: Vlastní zařízení pro sycení vzorků vodíkem



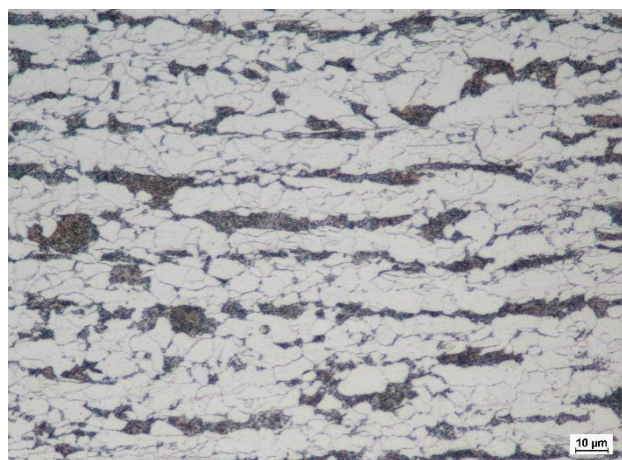
Obr. 3: Odběr vzorků z polotovaru oceli X52

Výsledky a diskuze

Mikrostruktura dodaného stavu oceli X52 byla v podélném i příčném řezu feriticko-perlitická (Obr. 4 a Obr. 5). Perlit byl v lamelární morfologii. Hodnota vrubové houževnatosti byla 94 J. Mez pevnosti dosahovala 618 MPa, mez kluzu 516 MPa, tažnost byla 28 %.



Obr. 4: VS_X52, střed, podélný řez 500x



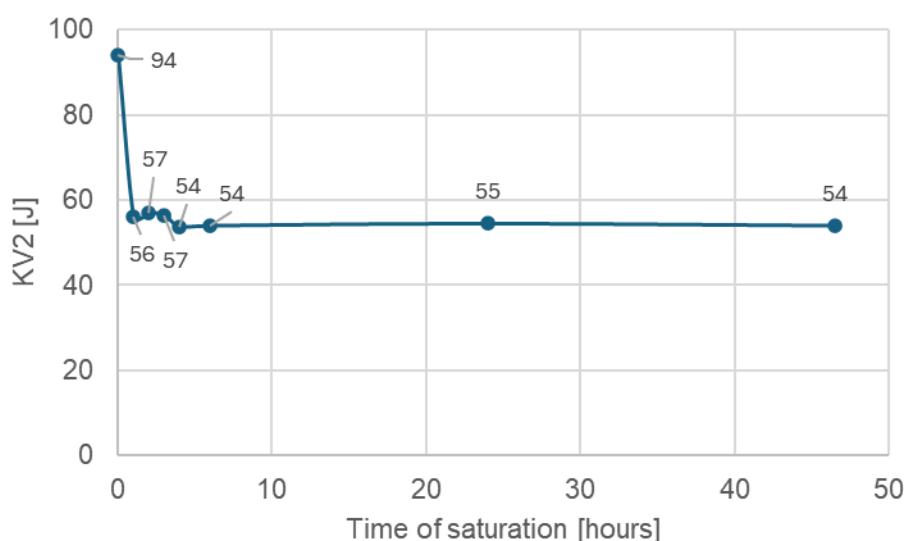
Obr. 5: VS_X52, střed, příčný řez 500x

Elektrolytické probíhalo přímo na vzorcích pro zkoušku rázem v ohybu, aby bylo zajištěno následné velmi rychlé odzkoušení nasyceného vzorku. Byla zkoušena doba od 1 až 47 h (Tab. 2). Po sycení vzorku po dobu 1 hodiny došlo k poklesu vrubové houževnatosti z počátečních

94 J na 56 J. Další prodlužování doby sycení se už na poklesu vrubové houževnatosti výrazně neprojevilo. I po výdrži 24 a 47 hodin byla změřena vrubová houževnatost 55, resp. 54 J. Z toho všeho vyplývá, že ocel X52 vykazuje výraznou odolnost vůči degradaci mechanických vlastností vlivem dlouhodobému vystavení vodíkovému prostředí.

Tab. 2: Parametry elektrolytického vodíkování oceli X52

Doba [h]	Elektrolyt	Proudová hustota [A/cm^2]	Proud [A]	Napětí [V]	KV ₂ [J]
0	0,5N H ₂ SO ₄ + 5 g/l CH ₄ N ₂ S	0,0152	0,22	2,2	94
1					56
2					57
3					57
4					54
6					54
24					55
47					54



Obr. 6: Vliv doby sycení na vrubovou houževnatost oceli X52

Shrnutí

Ocel X52, která je používána pro současný transportní systém zemního plynu, byla podrobena elektrolytické vodíkování v elektrolytu 0,5N H₂SO₄ + 5 g/l CH₄N₂S. Vliv doby vodíkování byla ověřována zkouškou rázem v ohybu.

Výsledky ukazují, že tato ocel má velmi dobrou odolnost vůči degradaci materiálu ve vodíkovém prostředí a vliv délky prodlevy se na mechanické vlastnosti téměř neprojevil. K největšímu poklesu vrubové houževnatosti došlo již při vodíkování po dobu 1 h. Kdy došlo k poklesu KV₂ z původních 94 J na 56 J. K dalšímu výraznému poklesu ani při prodloužení doby sycení na 47 hodin už nedošlo.

Poděkování

Výsledky projektu byly získány v rámci projektu HOOPLA č. TH83020002, který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR (TA ČR) v rámci Partnerského programu EPSILON CET Call 2022 a z Národního plánu obnovy v rámci složky 5.2 s názvem „Podpora výzkumu a vývoje v podnicích a zavádění inovací do podnikové praxe“ a její investice „Podpora výzkumu a vývoje v synergických efektech s rámcovým programem pro výzkum a inovace“.

Reference

- [1] LAUREYS, A. et al. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, vol. 101, paper 104534.
- [2] WANG, M. - AKIYAME, E. - TSUZAKI, K. Effect of hydrogen and stress concentration on the notch tensile strength of AISI 4135 steel. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 398, p. 37-46.
- [3] CAI, L. - ZHAO, L.M. Effect of Hydrogen Trapping and Poisons on Diffusion Behavior of Hydrogen in Low Carbon Steel. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 764, p. 3-10.
- [4] LEMUS, L.F. - RODRIGUES, J.H. - SANTOS, D.S. - ALMEIDA, L.H. Hydrogen Trap on the Microstructure of Cr-Mo Type Steels. *Defect and Diffusion Forum*, 2009, vol. 283-286, p. 370-375.
- [5] HAESELDONKCX, D. - D'HAESELEER, W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, p. 1381-1386.
- [6] GARCIA, C. I. - CHO, K. - HUA, M. J. - DeARDO, A. J. The alloy design and thermo-mechanically controlled processing (TMCP) of plate for high pressure, large diameter pipelines. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 638-642, p. 124-129.
- [7] ANGUS, R. G. *Hydrogen Induced Damage in Pipeline Steels*. Colorado School of Mines, Arthur Lakes Library, 2019.
- [8] ZHANG, T. - ZHAO, W. - GUO, W. - WANG, Y. Hydrogen Permeation Behavior through HSLA Steels and its Implications on Hydrogen Embrittlement Susceptibility. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 302, p. 310-316.
- [9] DEY, S. - SIVAPRASAD, S. - DAS, N. - CHATTORAJ, S. Study of Electrochemical Behavior, Hydrogen Permeation and Diffusion in Pipeline Steel. *Materials Science Forum*, 2012, vol. 1019, p. 145-156.
- [10] JULIAWATI, A. - RAZAK, N. A. A. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Pipeline Steel. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 315, p. 820-824.
- [11] WU, X. - ZHANG, H. - YANG, M. - JIA, W. - QIU, Y. - LAN, L. From the perspective of new technology of blending hydrogen into natural gas pipelines transmission: Mechanism, experimental study, and suggestions for further work of hydrogen embrittlement in high-strength pipeline steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, p. 8071-8090.
- [12] SONG, E.J. - BHADSHIA, H. - SUH, D. W. Effect of hydrogen on the surface energy of ferrite and austenite. *Corrosion Science*, 2013, vol. 77, p. 379-384.
- [13] LIU, Q. et al. Determination of the hydrogen fugacity during electrolytic charging of steel. *Corrosion Science*, 2014, vol. 87, p. 239-258.
- [14] EHRLIN, N. - BJERKÉN, C. - FISK, M. Cathodic hydrogen charging of Inconel 718. *AIMS Materials Science*, 2014, vol. 3, no. 4, p. 1350-1364.
- [15] GORDIAK, M. *Methods of hydrogenation of steels for experimental purposes*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2018, 35 p., Bachelor Thesis, Z-36/16/053.

ISOSTATICKÉ LISOVÁNÍ ZA TEPLA A JEHO APLIKACE

HOT ISOSTATIC PRESSING AND ITS APPLICATION

David Bricín, Zbyněk Špirit a Josef Strejcius

Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ)

Abstrakt

Isostatické lisování za tepla (HIP) patří mezi technologie tepelného zpracování materiálů, při kterém je upravovaná komponenta vystavena vysoké teplotě (až 2000 °C) a tlaku (až 207 MPa). Tlak je vytvořen pomocí použité ochranné atmosféry, kterou bývá nejčastěji argon. Působením vysoké teploty a tlaku dochází k částečné deformaci upravované komponenty, aktivaci difúzních procesů a creepu. To vede ve struktuře materiálu k uzavírání defektů jako jsou póry nebo kavity a komponenta tak má vyšší únavovou životnost. HIP se proto často používá jako konečná tepelná úprava u odlitků a v současné době se čím dál častěji uplatňuje u aditivně vyráběných dílů. V energetice kromě použití na odlitky nebo aditivně vyrobené komponenty může HIP nacházet své uplatnění při zpracování pokročilých keramických materiálů, při vytváření difúzních spojů nebo ve výrobě tlustostěnných komponent.

Abstract

Hot Isostatic Pressing (HIP) is a heat treatment technology where the component being treated is exposed to high temperature (up to 2000 °C) and pressure (up to 207 MPa). The pressure is formed by the protective atmosphere, which is usually argon. The high temperature and pressure cause partial deformation of the treated component, activation of diffusion processes, and creep. This leads to the closure of defects such as pores or cavities in the material structure and the component has a higher fatigue life. HIP is therefore often used as a final heat treatment for castings and is now increasingly being applied to additively manufactured components. In the energy industry, in addition to its use on castings or additively manufactured components, HIP can be used in the processing of advanced ceramic materials, in the formation of diffusion bonding, or the manufacture of thick-walled components.

Úvod

Izostatické lisování za tepla patří mezi technologie tepelného zpracování materiálu, která se v různých průmyslových aplikacích používána přes padesát let.

Z hlediska konstrukce lze lisy pro izostatické lisování za tepla rozdělit do dvou kategorií. První jsou lisy monolitické, druhou jsou lisy s předepnutou konstrukcí. K předepnutí konstrukce slouží vnější vynutí z drátů. Při provozu jednotky i v případě odstávky je tak tlaková nádoba namáhána z vnější strany tlakovým namáháním. Vyvozené namáhání brání vzniku a růstu defektů ve stěně nádoby. V případě, kdyby došlo k náhlému porušení nádoby, pak vnější vinutí z drátů brání celkovému roztržení tlakové nádoby a tlakový plyn může z nádoby odtékat postupně – nedochází ke vzniku tlakové rázové vlny [1].

Tepelné zpracování, ke kterému pak při izostatickém lisování za tepla dochází, probíhá v jedné či více pracovních komorách. U systémů modulárních s více komorami, je každá z komor určena k jiné technologické operaci. Jedna tak bývá používána k předehřevu materiálu. Odtud pak bývá materiál přesunut do části, v které proběhne izostatické lisování za tepla. V posledním kroku nebo části zařízení pak dochází k ochlazování materiálu. K tomu se používají ochlazovací boxy, resp. komory [2]. U systémů s jednou komorou pak nedochází k přesunu materiálu a celý tepelný cyklus probíhá v jedné komoře. U těchto moderních systémů, u kterých je možné řídit rychlost ochlazování průtokem inertní ochranné atmosféry lze dosáhnout vysokých rychlostí ochlazování vyšší než 2000 °C/min [3], v závislosti na velikosti HIP jednotky a materiálu, který je zpracováván tak lze provádět kompletní tepelné zpracování výrobku včetně

kalení a popouštění jeho struktury. Tím lze výrazně zkrátit časy nutné pro zpracování vsázky, snížit množství ohřevů vsázky a celkově snížit výrobní náklady spojené s jejím tepelným zpracováním.

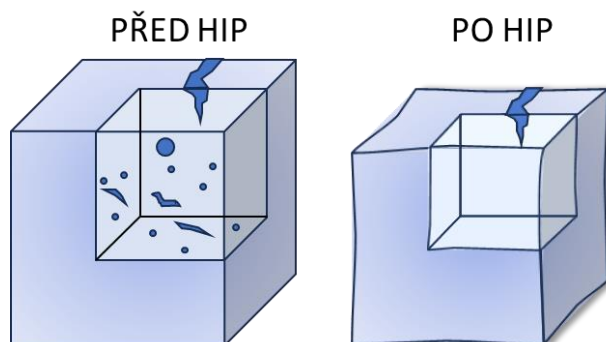
Komory-pece, ve kterých probíhá tepelné zpracování při HIP procesu, jsou vyrobeny z různých typů žáropevných materiálů, jako je např. molybden, grafit, wolfram nebo platina. Pro zpracování ocelí a slitin neželezných kovů se používají pece molybdenové s pracovní teplotou do cca 1400 °C. Pro zpracování keramických materiálů, které mají vyšší teplotu tavení se pak používají např. pece grafitové, které umožňují ohřev vsázky až na teplotu cca 2200 °C [4].

Velikost komory pak určuje velikost zpracovávaných komponent a jejich množství. Z tohoto pohledu se tato technologie používá spíše pro méně objemné výrobky vyráběné v několika kusech nebo malých sériích. Největší vyráběné jednotky bývají v současné době osazeny komorami o průměru větším než 3 m [5,6]. Z tohoto pohledu je pak tedy možné v dnešní době zpracovávat HIP technologií komponenty o hmotnosti od několika gramů až po hmotnost několika tun.

Aplikace HIP

Mezi nejznámější aplikaci patří zpracování prášků a směsí prášků do podoby finálního produktu [7]. V tomto případě bývá prášek vložen do pouzdra, které má tvar vyráběného produktu. Protože v průběhu HIP procesu dochází v důsledku působení vnějšího tlaku k deformaci pouzdra a zmenšení objemu výrobku, je nutné s touto změnou při návrhu tvaru pouzdra počítat. Pouzdra nebo formy ve kterých dochází ke zpracování práškového materiálu se volí s ohledem na jeho typ (keramika X ocel). Pro ocelové prášky se pouzdra běžně vyrábějí svařováním tenkostěnných ocelových plechů [8]. Z toho plyne určité omezení ve tvaru vyráběné součásti. Kromě toho je nutné po HIP procesu pouzdro z výrobku odstranit. K tomu bývají používány např. různé postupy třískového obrábění. Při výrobě obráběcích nástrojů pak bývají prášky zpracovány do podoby finálního produktu lisováním na lisech. Částice prášku jsou v tomto případě drženy pohromadě pomocí sekundárních pojiv, která se v průběhu HIP procesu odpaří.

Další aplikací HIP technologie je zpracování odlitků. Při tom dochází k uzavírání licích defektů jako jsou např. řediny a homogenizaci struktury výrobku [9]. To platí v případě defektů nekomunikujících s povrchem, viz obr. 1. Pokud defekt vystupuje na povrch tak je jeho geometrie podobná před i po HIP zpracování komponenty. Důvodem, proč dochází při HIP zpracování výrobků k uzavírání pórů a mikrostrukturním změnám je skutečnost, že upravovaný materiál je vystaven vysoké teplotě až 2000 °C a tlaku, až 207 MPa, který vytváří použitá ochranná (inertní) atmosféra, běžně Argon [10].



Obr. 1: Vliv HIP na pórovitost upravované komponenty

Díky tomu dochází k plastické deformaci povrchu komponenty, aktivaci difúzních dějů a creepu [11], přičemž konečná struktura je dále ovlivněna výdrží na teplotě, při které proces HIP probíhá a rychlostí ochlazování z této teploty. Teplota procesu bývá volena s ohledem na fázové složení zpracovávaného materiálu. Obvykle se pak pohybuje kolem ca 80 % jeho teploty

tavení, v případě jednofázového materiálu [12]. V případě vícefázového materiálu běžně dochází k roztavení jedné nebo více fází a zpracování materiálu tak probíhá s výskytem kapalně fáze (např. výroba obráběcích nástrojů na bázi WC+Co). Teplota HIP procesu se pak většinou volí podle fáze s nejvyšší teplotou tavení.

Rychlost ochlazování je možné u moderních HIP jednotek řídit průtokem inertní ochranné atmosféry a lze tak dosáhnout vzniku nerovnovážných struktur či omezit precipitaci nevyhovujících strukturních fází a omezit hrubnutí zrna materiálu podobně jako v případě konvenčního kalení materiálu.

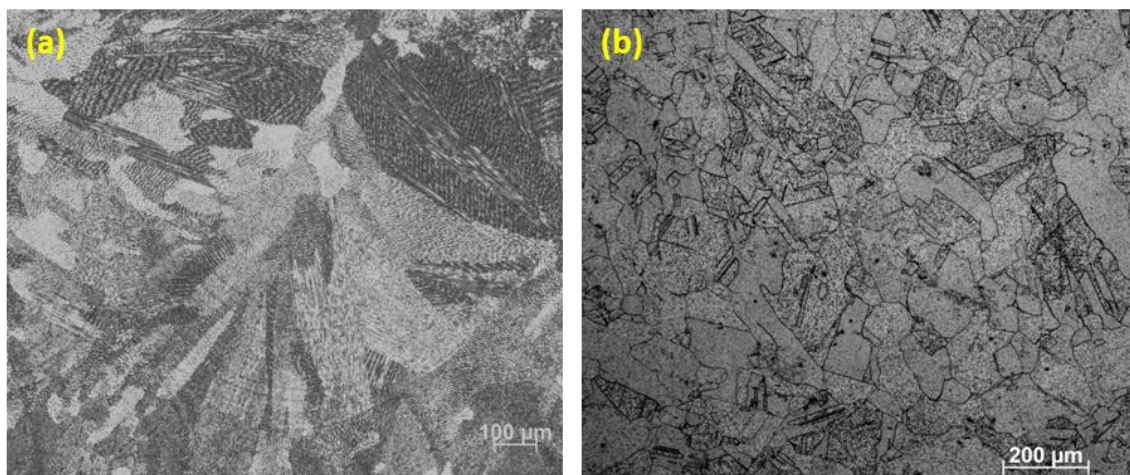
Díky působení vysokého tlaku při HIP zpracování odlitku, je pak možné při jeho tepelném zpracování používat nižší teploty oproti konvenčním způsobům. Tím lze omezit např. hrubnutí zrn materiálu odlitku. Vyšší tlak také může ovlivnit vývoj strukturních fází ve struktuře zpracovávaného materiálu. Zvýšení pracovního tlaku způsobuje změny v časech počátku a konce fázových přeměn a teplot při kterých k jejich transformaci dochází.

Třetí aplikací, ke které je HIP technologie používána je vytváření difúzních spojů [13] mezi jedním nebo více materiály ve formě prášku nebo kompaktního materiálu a čtvrtou aplikací, která se v současné době dostává do popředí je použití technologie HIP při tepelném zpracování komponent vyrobených 3D tiskem [14].

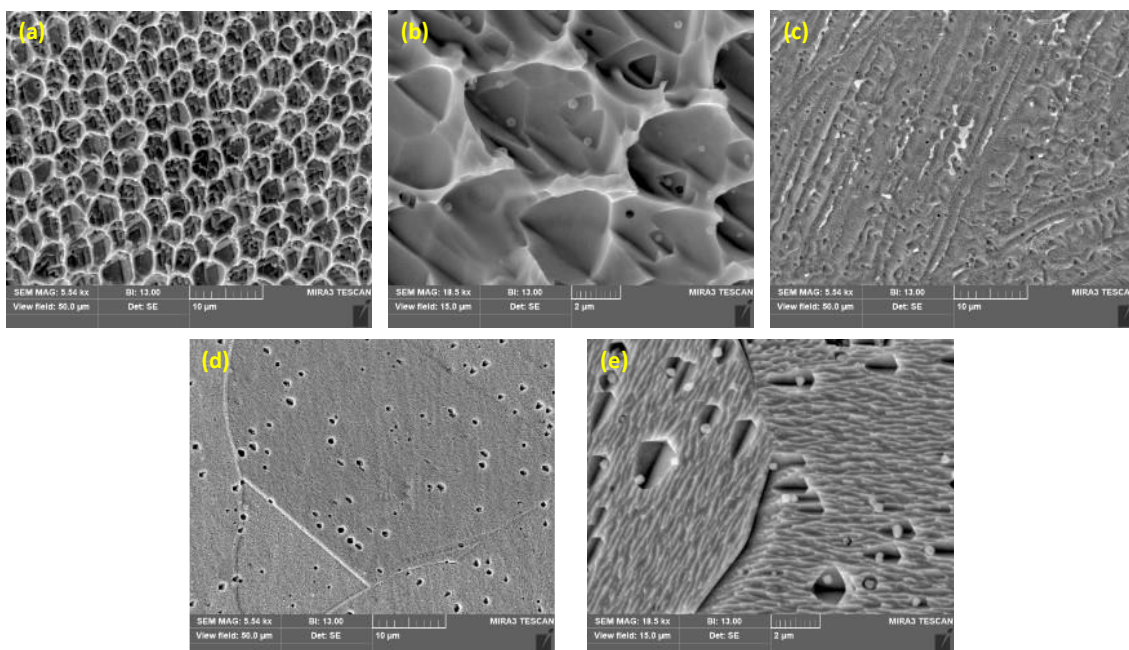
Při 3D tisku z kovových prášků nebo drátu, technologií DED nebo LBF je možné vytvořit kompaktní součást a tu pak tepelně zpracovat. Některými technologiemi 3D tisku je pak možné vytvořit pouze skořepinu- vnější obálku vytvářené komponenty a zbytek materiálu nechat v původním stavu, tj. ve formě prášku. Pokud bude skořepina kompaktní bez přítomnosti na povrch průchozích defektů, tak dojde obdobně jako u jiných výrobků práškové metalurgie při aplikaci HIP ke slinutí částic a konečná struktura výrobku bude kompaktní – celistvá. Tento druhý způsob kombinace technologie 3D tisku a HIP technologie může razantně zvýšit efektivitu výroby zejména u objemných komponent o větších rozměrech jejichž výroba 3D tiskem může být problematická a v případě tisku celého objemu komponenty časově náročná.

Aplikace HIP v CVŘ

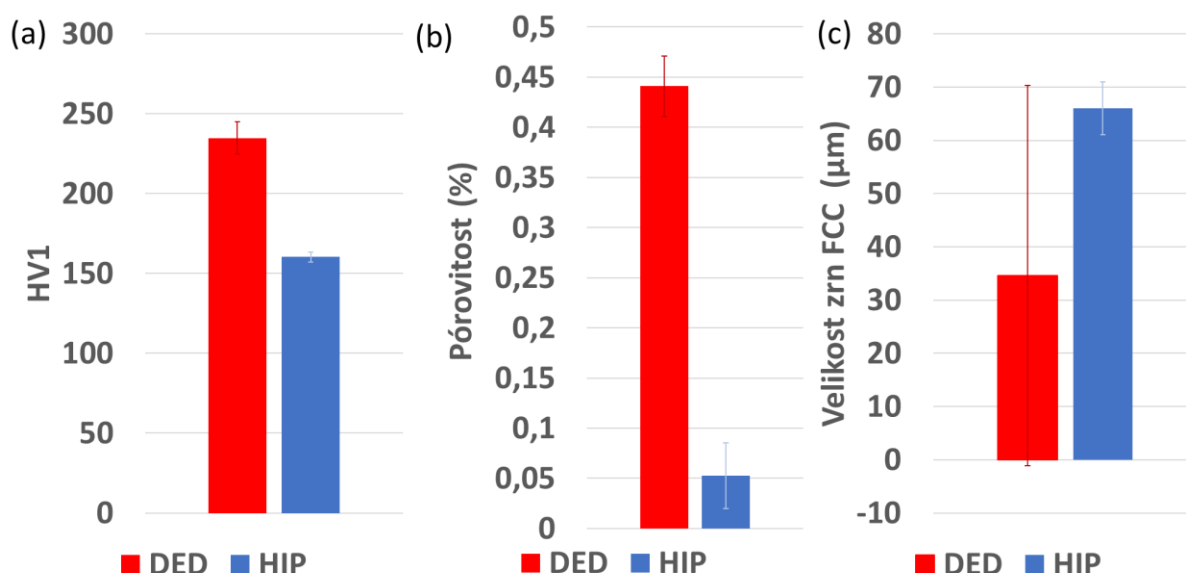
Jednou z aplikací HIP v CVŘ je výzkum v oblasti 3D tisku kovových slitin. První experimenty byly zaměřeny na hodnocení vlastností a mikrostrukturu austenitické oceli AISI 316L. Vzorky byly vytvořeny technologií DED ve spolupráci s výzkumnou společností COMTES FHT a.s. HIP zpracování bylo provedeno na zařízení společnosti Quintus. Níže, viz obr. 2 a obr. 3, jsou uvedeny metalografické snímky deklarující změny, ke kterým ve struktuře vzorků došlo v důsledku jejich zpracování technologií HIP. Metalografické snímky jsou doplněny o výsledky z provedeného měření tvrdosti a obrazové analýzy, viz obr. 3.



Obr. 2: Porovnání makrostruktury vzorku: (a) stav DED, osa Z; (b) stav HIP, osa Z



Obr. 3: Mikrostruktura vzorků před zpracováním HIP (a-c) a po jejím zpracování (d-e)



Obr. 4: Vliv zvolených parametrů HIP na tvrdost (a); pórovitost (b) a velikost austenitického zrna (c)

Výše uvedené výsledky se dají shrnout následovně:

- V důsledku HIP zpracování došlo k hrubnutí struktury zrn fáze austenitu. Orientace rekrystalizovaných zrn austenitu byla vůči výchozí struktuře po HIP nahodilá.
- V důsledku HIP došlo k rozpuštění buněčné struktury a částic delta feritu.
- V důsledku hrubnutí zrn a v důsledku snížení zbytkových napětí došlo ke snížení tvrdosti struktury po HIP zpracování.
- Struktura po HIP obsahovala nižší podíl pórů.
- Nebyl zaznamenán rozdíl v rozložení a podílu oxidických částic. Velikost těchto částic, které se nacházely jak po hranicích zrn austenitu, tak v jejich objemu se pohybovala v řádu jednotek až desítek nanometrů.

Další výzkum, který bude probíhat po instalaci HIP jednotky v laboratořích CVŘ bude zaměřen nejenom na výše uvedenou oblast aditivních technologií a austenitické oceli. Kromě toho

bude probíhat materiálový výzkum v oblastech spojených s vývojem nových materiálů pro potřeby stávajících zdrojů energie tak pro energetické zdroje nových generací. Z toho důvodu bude jeho část zaměřena do oblasti niklových slitin pro MSR, HEA slitin, ODS ocelí nebo keramických materiálů.

Závěr

Článek shrnuje základní informace o technologii izostatického lisování za tepla a její aplikace v průmyslu a v rámci CVŘ.

Poděkování

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR. Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

Literatura

- [1] EKLUND, Anders - MATZIE, A. Regis. Hot Isostatic Pressing of Radioactive Nuclear Waste: The Calcine at INL. *Materials Research Proceedings*, 2019, vol. 10, p. 11-17, doi: 10.21741/9781644900031-2
- [2] KONO, Megumi - WATANABE, Katsumi. Recent Developments of HIP Equipment in JAPAN. *Materials Research Proceedings*, 2019, vol. 10, p. 92-97, doi: 10.21741/9781644900031-13
- [3] EKLUND, Anders - AHLFORS, Magnus. Hot Isostatic Pressing in the Automotive Industry: Case study of Cast Aluminum Alloys for Rims of Car Wheels. *Materials Research Proceedings*, 2019, vol. 10, p. 18-23, doi: 10.21741/9781644900031-3
- [4] SHIPLEY, Jim. The next level of hot isostatic pressing. *Thermal processing* [online]. 2021 [cit. 2024-09-16], p. 27-30. Available on: <https://thermalprocessing.com/the-next-level-of-hot-isostatic-pressing/>
- [5] EKLUND, Anders - AHLFORS. TeraPi – A 3.5-Meter Diameter Hot Zone Unit Enables HIPing of Large Components. *Materials Research Proceedings*, 2019, vol. 10, p. 197-202, doi: 10.21741/9781644900031-26
- [6] CHEN, Hongxia - ZHANG, Deming - YE, Qing. Large-Scale and Industrialized HIP Equipment for the Densification of Additive Manufactured Parts. *Materials Research Proceedings*, 2019, vol. 10, p. 47-57, doi: 10.21741/9781644900031-7
- [7] SKOTNICOVÁ, Kateřina a KURSA Miroslav. *Prášková metalurgie*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, p. 73-74. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [8] LEMOISSON, F. - FROYEN, L. Understanding and improving powder metallurgical processes [online]. *Fundamentals of Metallurgy*. Elsevier, 2005, p. 471-502. ISBN 9781855739277. doi: 10.1533/9781845690946.2.471
- [9] NAYHUMWA, C. - GREEN, N. R. - CAMPBELL, J. Influence of casting technique and hot isostatic pressing on the fatigue of an Al-7Si-Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, vol. 32, no. 2, p. 349-358. ISSN 1073-5623. doi: 10.1007/s11661-001-0266-8
- [10] KEWATE, Onkar Jaywant - PUNNIYAKOTI, Sathyanarayanan. Ti₃AlC₂ MAX phase and Ti₃C₂T_x MXene-based composites towards supercapacitor applications: A comprehensive review of synthesis, recent progress, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 2023, vol. 72, part C, paper 108501. ISSN 2352152X. doi: 10.1016/j.est.2023.108501
- [11] ATKINSON, H. V. - DAVIES, S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, vol. 31, no. 12, p. 2981-3000. ISSN 1073-5623. doi: 10.1007/s11661-000-0078-2

- [12] EKLUND, Anders - AHLFORS, Magnus. Heat treatment of PM parts by Hot Isostatic Pressing. *Metal Powder Report*, 2018, vol. 73, no. 3, p. 163-169. ISSN 0026-0657. doi: 10.1016/j.mprp.2018.01.001
- [13] ASHWORTH, M.A - JACOBS, M.H - DAVIES, S. Basic mechanisms and interface reactions in HIP diffusion bonding. *Materials & Design*, 2000, vol. 21, no. 4, p. 351-358. ISSN 02613069. doi: 10.1016/S0261-3069(99)00088-6
- [14] DU PLESSIS, A. - MACDONALD, E. Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 34, paper 101191. ISSN 22148604. doi: 10.1016/j.addma.2020.101191

VLASTNOSTI 3D TIŠTĚNÉHO MATERIÁLU HX PRO POTENCIÁLNÍ POUŽITÍ V ENERGETICE

PROPERTIES OF 3D PRINTED HX MATERIAL FOR POTENTIAL ENERGY APPLICATIONS

Josef Cizner, Jan Hruška a Vít Steiner

SVÚM a.s., www.svum.cz

Abstrakt

Materiály, technologie, jejich zpracování a následné výroby komponent používané v energetickém sektoru v současnosti již v řadě aplikací naráží na své limity. U nejvíce zatížených komponent jako jsou například tepelné výměníky, využívající vysokoteplotní chladiva (dusík/helium), lopatky turbín, či různé armaturní prvky, se objevují problémy způsobené nedostačnou rezervou v mechanických vlastnostech a korozní odolnosti. Další problémy nastávají také v možnosti výroby tvarově složitých dílů, jež jsou běžnými obráběcími postupy obtížně vyrobitelné. Tento příspěvek shrnuje doposud získané výsledky testování materiálu EOS HX, připraveného metodou 3D tisku, v porovnání s konvenční variantou Alloy HX. Testování probíhalo, jak za vysokých teplot s cílem zjistit korozní odolnost v prostředí simulující chladiva gen IV. reaktorů, tak také mechanicky s cílem stanovit rozdíly v pevnostním, únavovém a creepovém chování.

Abstract

The materials and technologies for their processing and subsequent production of components used in the energy sector are currently reaching their limits in many applications. For the most heavily loaded components such as heat exchangers using high temperature coolants (nitrogen/helium), turbine blades, or various valve elements, problems arise due to insufficient margins in mechanical properties and corrosion resistance. Further problems also arise in the possibility of producing complex parts that are difficult to manufacture by conventional machining processes. This paper summarises the results obtained so far in testing EOS HX material, prepared by 3D printing technology compared with conventional variant of Alloy HX. Testing was conducted both at high temperatures to determine corrosion resistance in an environment simulating Gen IV reactor coolants, and mechanically to determine differences in strength, fatigue and creep behaviour.

Úvod

Hastelloy X (Alloy HX) je niklová substitučně zpevněná super slitina s vynikající kombinací vlastností, které jí předurčují pro použití v nejnáročnějších aplikacích – vysoká žáruvzdornost, žárupevnost a také přijatelná obrobitelnost [1]. Tento materiál je uvažován pro konstrukci velmi namáhaných součástí budoucích reaktorů IV. generace, a to nejen kvůli svým vlastnostem, ale také vzhledem k faktu, že se jedná o slitinu, kterou je možné tisknout pomocí aditivních technologií. Protipól konvenční slitiny je materiál EOS NickelAlloy HX určený pro DLMS tisk. Tento materiál je určen pro přímý tisk bez nutnosti následného tepelného zpracování – tepelným zpracováním lze však dosáhnout změny vlastností oproti as-built stavu [2]. V rámci této práce bylo provedeno hodnocení a porovnání některých vlastností konvenční slitiny HX s 3D tištěnou variantou (DLMS technologie – PBF), která byla připravena na spolupracujícím pracovišti Regionálního Technického Institutu při ZČU v Plzni. Vlastní testování proběhlo za vysokých teplot s cílem porovnat mikrostrukturní a korozní změny a také byly porovnány mechanické, creepové a vybrané únavové vlastnosti obou slitin.

Zkoušení materiály, technologie výroby a podmínky testů

Zkoušené nástřiky, technologie a podmínky testů

V rámci porovnání vlastností byly připraveny jednotlivé vzorky, a to jak z konvenční tváření slitiny Alloy HX, tak také DLMS tiskem z prášku EOS NickelAlloy HX (též UNS N06002 nebo ASTM B572-06). Jednalo se o materiál ve formě prášku s velikostmi zrn od cca 10 μm – 65 μm (90 % prášku ve velikostech částic v rozmezí 20–45 μm). Chemické složení obou materiálů je nominálně shodné a je uvedeno v Tab. 1. DMLS vzorky byly vytištěny na tiskárně EOS M290, a to jak v horizontálním, tak také vertikálním směru viz Obr. 1.

Tab. 1: Chemické složení slitiny HX

EOS NickelAlloy HX/Alloy HX									
Prvek	Ni	Cr	Fe	Mo	W	Co	Ti	Cu	Al
Min (%)	Bal.	20,5	17	8	0,2	0,5	-	-	-
Max (%)	Bal.	23	20	10	1	2,4	0,5	0,5	0,5

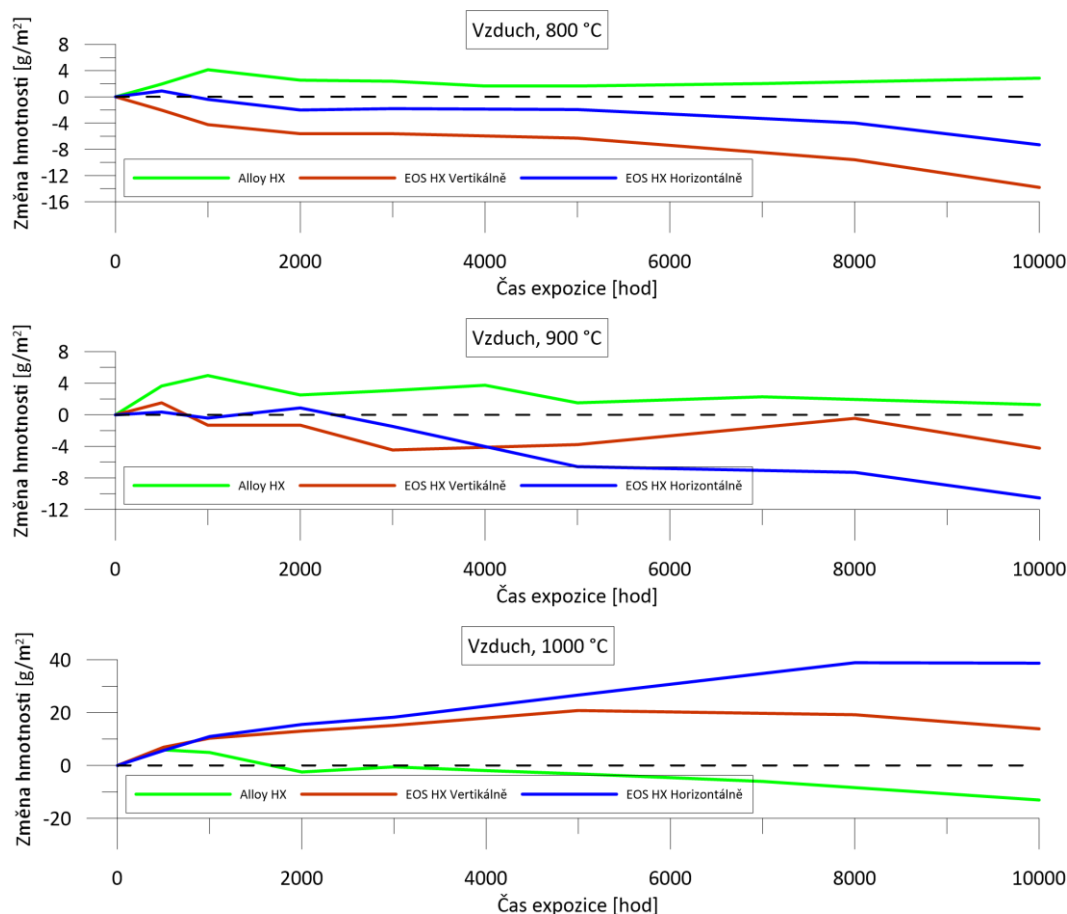


Obr. 1: Tiskárna EOS M290 (vlevo), vytištěné vzorky (vpravo)

Výsledky a hodnocení po tepelné expozici

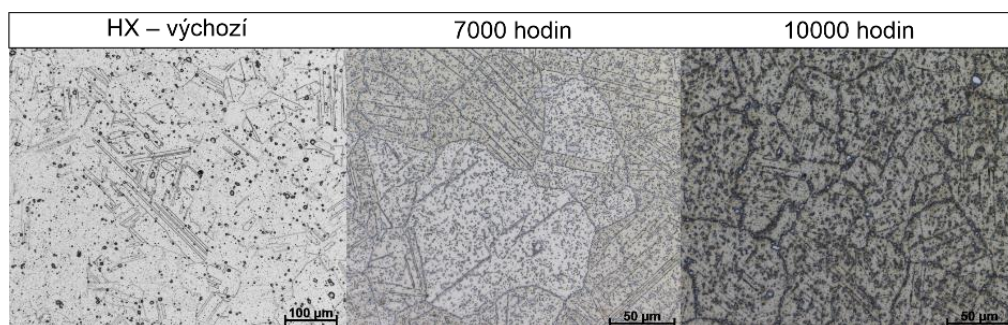
Stárnutí na vzduchu

Vysokoteplotní expozice probíhaly v odporových pecích, kdy byl každý ze zkoušených vzorků umístěn v korundové lodičce pro následné gravimetrické hodnocení. Teploty expozic byly 800, 900 a 1000 °C. Současně byly na dané teploty temperovány také zkušební tyče pro zkoušky tahem, které byly následně použity pro vyhodnocení změn mechanických vlastností – tyto expozice byly započaty na základě zjištěných změn mikrostruktury v závislosti na teplotě žíhání. Na následujících grafech jsou shrnuty veškerá gravimetrická data, která byla pořízena během izotermických expozic materiálů při teplotách 800, 900 a 1000 °C – Obr. 2. Celkově byly naměřené hmotnostní změny velmi nízké a v mnoha případech na hranici vážitelnosti. Určité změny vykazovaly vzorky při 1000 °C, kdy byly hmotnostní změny největší, avšak i tak se jednalo o změny v řádu jednotek desítek gramů na metr čtvereční – 10 g/m² hmotnostního přírůstku (u oceli) odpovídá korozní rychlosti cca 0,0025 mm/rok, což je zanedbatelná hodnota. Lehce vyšší hmotnostní změny u tisknutých vzorků byly zřejmě dány členitým povrchem, kdy byl exponován as-built stav.



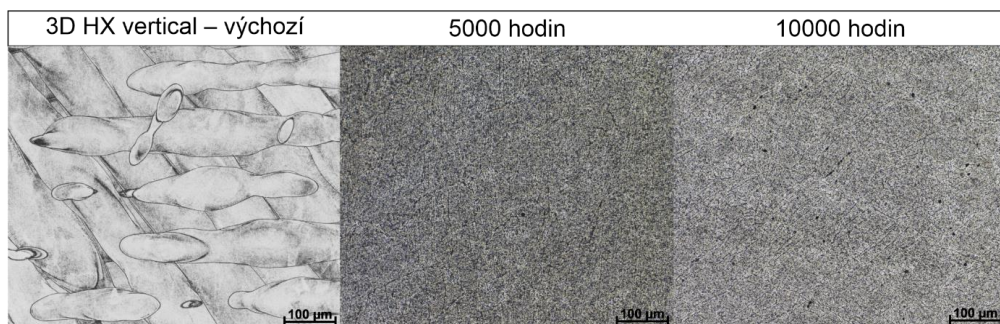
Obr. 1: Výsledky gravimetrie slitiny HX při 800, 900 a 1000 °C

Výsledné mikrostruktury konvenčního materiálu Alloy HX jsou uvedeny na obrázcích pro teplotu 800 °C v různých časech (výchozí stav, 7000 hodin a 10000 hodin) expozice, viz Obr. 3. Z expozic výchozího/konvenčně vyrobeného materiálu HX je patrné, že po určité době žíhání dochází při teplotě 800 °C a částečně i při 900 °C k silné precipitaci fázi v celé struktuře materiálu. Při teplotě 1000 °C jsou již tyto precipitáty méně rozptýlené a zpětně se rozpouští či shlukují do větších celků (vzhledem k omezenému rozsahu příspěvku jsou uvedeny jen některé struktury).



Obr. 3: Mikrostruktura slitiny HX po expozici při 800 °C

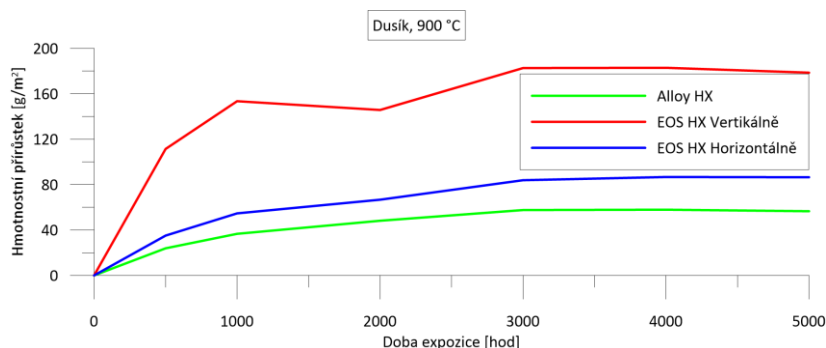
Další obrázky (Obr. 4) ukazují vývoj/změnu mikrostruktury v případě materiálu EOS NickelAlloy HX tisknutém ve vertikálním směru. Metalografický výbrus byl připraven v kolmém řezu, tj. rovnoběžně s jednotlivými aditivními vrstvami, které se kladou při vlastním tisku – na Obr. 4 jsou vidět celkově dvě různé vrstvy jednotlivých „housesnek“ slitiny (ve výchozím stavu) nicméně po 5000 hodinách resp. 10000 hodinách žíhání při 800 °C je struktura více či méně rekrytalizovaná v částečně austenitické podobě s precipitáty stejně jako v případě konvenčního materiálu.



Obr. 4: Mikrostruktura slitiny 3D HX vertikální tisk po expozici při 800 °C

Expozice v dusíku

Expoziční testy v modelovém prostředí simulující chladivo reaktorů čtvrté generace (dusík) byly zahájeny v plynatěsných pecích vybavených korundovými muflami. Jednotlivé vzorky zkoušených materiálů byly umístěny v korundových lodičkách a v celé sestavě vloženy do pracovního prostoru pece.



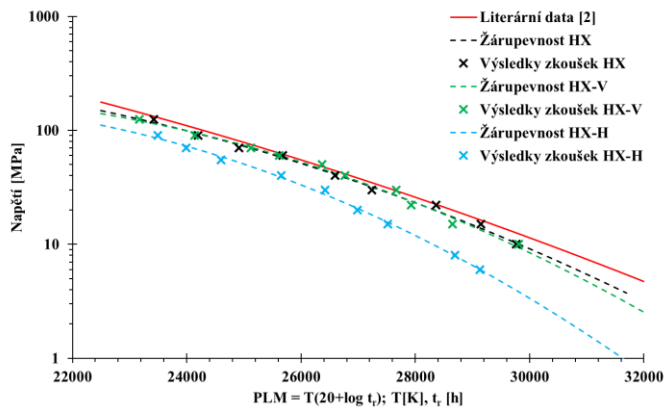
Obr. 5: Vývoj hmotnostních změn v čase u expozic v dusíku při 900 °C

Před vlastními expozicemi je prostor pece promýván zkušební atmosférou s cílem vypudit ze systému zbytkový kyslík – na výstupu je analyzátor plynů, který před začátkem expozice ověří obsah O₂ v odpadní atmosféře. I přesto, že takto naměřený obsah kyslíku je na úrovni měřicí chyby přístroje nelze předpokládat prostředí 100 % bez oxidačního potenciálu.

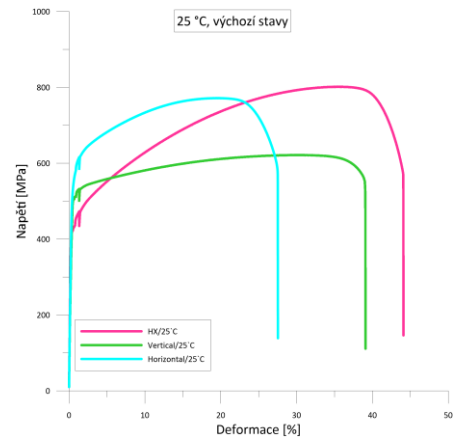
Průběžné gravimetrické výsledky expozic v dusíku při 900 °C jsou uvedeny na Obr. 5, kde jsou shrnuty v grafu, ze kterého je patrné, že po úvodní rapidní změně hmotnosti (oxidaci) došlo u slitiny HX k zastavení, resp. značnému zpomalení další degradace. Hodnoty hmotnostních změn jsou vyšší než případy expozic na vzduchu, což je patrně dáno faktem, že žáruvzdornost této slitiny (niklových slitin obecně) je dána tvorbou protektivních oxidů na povrchu a prostředí dusíku s minimem kyslíku zpomaluje tvorbu této ochranné vrstvy na povrchu.

Creepové zkoušky

V rámci řešení tohoto projektu byly provedeny creepové testy výchozího materiálu Alloy HX a také 3D variant EOS HX, a to ve formě jak krátkodobých testů (vyšší zatížení a nižší předpokládaná doba do lomu), tak také dlouhodobé testy s časy několik tisíc hodin do lomu. Žárupevnost byla testována při teplotách 800, 900 a 1000 °C. Výsledky zkoušek byly vyhodnoceny pomocí Larson-Millerova parametru P_{LM} , podle regresního modelu $\log \sigma = A_1 + A_2 P_{LM} + A_3 P_{LM}^2$, kde $P_{LM} = T \cdot (\log(t_r) + A_4)$. V grafu (Obr. 6) jsou znázorněny všechny vyhodnocené výsledky zkoušek a porovnány křivky žárupevnosti jednotlivých materiálů (HX – výchozí konvenční slitina, HX-V – vertikálně 3D tištěná slitina HX, HX-H horizontálně tištěná). Z dosavadních výsledků je patrné, že žárupevnost materiálu vyrobeného metodou 3D tisku je srovnatelná s žárupevností klasického materiálu v případě vertikálního tisku, viditelné rozdíly jsou ovšem u tažnosti daného materiálu a také v případě horizontálního tisku, kde jsou doby do lomu nižší než v případě konvenční slitiny.



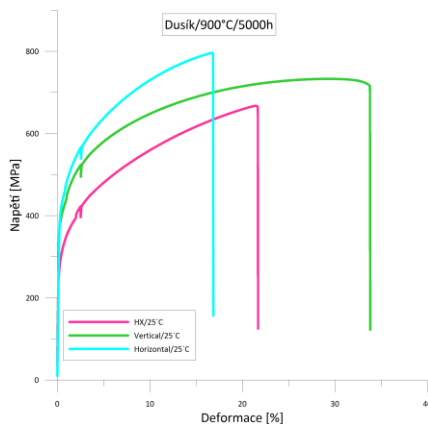
Obr. 6: Žárupevnost slitiny HX a EOS HX



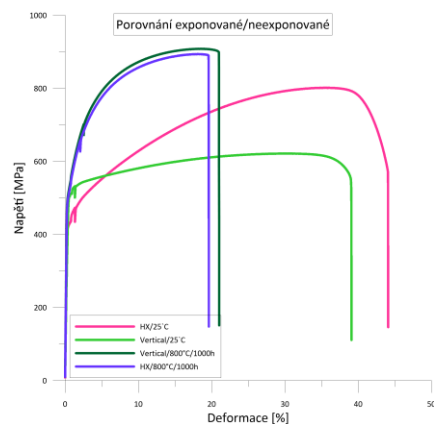
Obr. 7: Mechanické vlastnosti výchozích stavů

Mechanické testy

V rámci hodnocení teplotní odolnosti/změny vlastností tyčí ze slitiny Alloy HX vyrobených 3D tiskem, byly připraveny vzorky pro tahovou zkoušku, které byly exponovány společně s ostatními korozními kupony. Následně se sledovala změna vlastností oproti výchozímu stavu, kdy po dlouhodobé teplotní expozici došlo ke změně mikrostruktury slitiny, a byl předpoklad, že dojde ke změně mechanických vlastností. Tahové zkoušky byly provedeny dle ČSN EN ISO 6892-1. Obr. 7 zobrazuje výsledné křivky napětí-deformace pro výchozí slitiny, kde jsou patrné určité rozdíly v pevnosti a houževnatosti, a to zejména u horizontálně tisknutého stavu slitiny EOS HX.



Obr. 8: Mechanické testy po expozici v dusíku



Obr. 9: Srovnání exponovaného/neexponovaného stavu

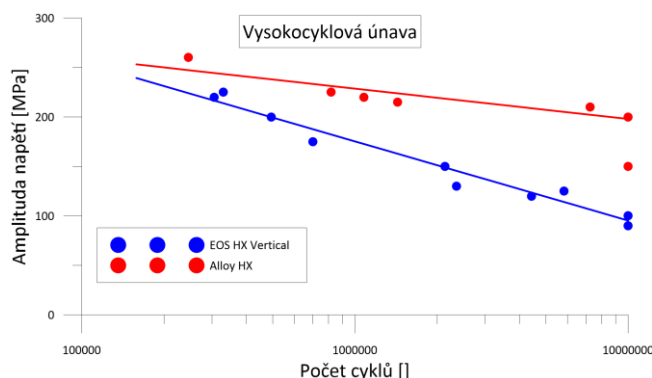
Vzhledem ke změnám ve struktuře byly zkušební tyče po expozici 5000 hodin v dusíku při teplotě 900 °C značně zkřehlé vlivem precipitace karbidů v materiálu – Obr. 8 ukazuje výsledné tahové diagramy, kde je patrný výrazný pokles houževnatosti u všech variant slitiny HX. Zajímavé je také porovnání výsledků výchozího stavu a vzorků exponovaných při 800 °C na vzduchu – viz Obr. 9 (prozatím nejsou kompletní výsledky), kde je patrný výrazný pokles tažnosti a zvýšení pevnosti tyčí po žíhání při 800 °C, kdy došlo ve struktuře k masivní precipitaci.

Vysokocyklová únava

Zkouška únavy řízená konstantní silou byla provedena podle ASTM E486-23a na rezonančním zkušebním stroji RUMUL Testronic se silovou kapacitou 100 kN. Zkouška byla provedena

při pokojové teplotě a při asymetrii cyklu zatížení $R = 0$ (míjivý tah). Kritérium porušení bylo určeno jako pokles frekvence o 10 Hz nebo dosažení 10^7 cyklů.

Získána data (Obr. 10) jsou zobrazena v semi-logaritických souřadnicích a šikmá větev S-N (Wöhlerovy) křivky je proložena mocninou funkcí pro materiály EOS HX Vertical (modře) a Alloy HX (červeně). Trend (modrý) materiálu EOS HX (byl testován pouze vertikálně tištěný stav) má výraznější sklon, než trend (červený) materiálu Alloy HX, který vykazuje mírnější pokles. Tento rozdíl ukazuje, že materiál Alloy HX má lepší odolnost vůči vysokocyklové únavě než materiál EOS HX. Materiál EOS HX má o 59,3 % rychlejší pokles amplitudy napětí s rostoucím počtem cyklů ve srovnání s materiálem Alloy HX.



Obr. 10: S-N křivka materiálů Alloy HX a EOS HX

Závěr

Z dosavadních provedených testů materiálu EOS Alloy HX vyplývá, že oproti konvenční variantě má některé vlastnosti odlišné. Největší rozdíl je v případě únavového chování, kdy při vyšších počtech cyklů je 3D tištěná varianta zřejmě méně odolná. Naopak v případě vertikálního tisku je i při vysokém poklesu plasticity creepové chování prakticky shodné se základním materiálem. Korozní chování za vysokých teplot je fakticky nezávislé na variantě tisku a jedná se o vysoce odolnou slitinu. Bylo zjištěno, že po delších časech expozice za určitých teplot (kolem 800 °C), dochází k masivní precipitaci a skokové změně mechanických vlastností, a to jak u konvenční varianty, tak i DLMS tisku.

Poděkování

Tento projekt byl spolufinancován Technologickou agenturou ČR v rámci programu Théta v projektu TK04020056.



Literatura

- [1] SURREDDI, K. B. - SANNI, O. C. - BRODIN, H. Microstructure and mechanical behavior of as-built and heat-treated Hastelloy-X alloy produced by Laser Powder Bed Fusion process. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 111, p. 373-376, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.169>
- [2] EOS. *Material data sheet - FlexLine EOS NickelAlloy HX*. EOS [online]. [n.d.]. Available on: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/nickelalloy-inconel/eos_hx_9011-0023_m400-4_mds_flexline_07-22_en.pdf

VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ K OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OCELOVÝCH DESEK VYROBENÝCH 3D TISKEM

USE OF NONDESTRUCTIVE TESTING TO VERIFY THE PROPERTIES OF 3D-PRINTED STEEL PLATES

Jana Veselá a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

V rámci TAČR projektu Canut II – Repair Technologies, v rámci podprojektu DP_02_02_01 Využití aditivní technologie v JE byly realizovány nedestruktivní (NDT) zkoušky na ocelových deskách vyrobených technologiemi 3D tisku. Výsledky těchto zkoušek budou validovány výsledky destruktivních zkoušek (DT) a metalografickým rozbořem provedeném na první tištěné desce z nerezové oceli AISI 316L a první tištěné desce z uhlíkové oceli A508.

Základní aplikovanou NDT metodou bylo ultrazvukové zkoušení (UT) se zaměřením na detekci vnitřních vad tištěné struktury, ale také na měření ultrazvukových vlastností ve všech třech osách, nejen v ose tisku desky. Získané parametry se využívají k výpočtu Youngova modulu pružnosti E a modulu ve smyku G . Případně zjištěné vady a moduly jsou srovnány s výsledky destruktivních (DT) zkoušek, jmenovitě s tahovými zkouškami a rázem v ohybu. Součástí ověření vlastností je i metalografické hodnocení mikrostruktury desek ve vybraných místech.

Z dalších NDT zkoušek byly využity penetrační zkouška (PT) pro detekci povrchových vad a rentgenografická zkouška (RT), která jako druhá objemová metoda přináší výsledky přímo porovnatelné s výsledky UT.

Abstract

As part of the TAČR project Canut II – Repair Technologies, within the subproject DP_02_02_01 Use of additive technology in nuclear power plants, non-destructive (NDT) tests were carried out on the steel plates made by the 3D printing. The results of these tests will be validated by the results of destructive tests (DT) and metallographic analysis performed on the first printed plate made of AISI 316L stainless steel and the first printed plate made of A508 carbon steel A508.

The basic applied NDT method was ultrasonic testing (UT) with a focus on the detection of internal defects of the printed structure, but also on the measurement of ultrasonic properties in all three axes, not only in the printing axis of the plate. The obtained parameters are used to calculate Young's modulus of elasticity E and shear modulus G . Any defects and moduli detected are compared with the results of destructive (DT) tests, namely tensile tests and bending impact. A metallographic evaluation of the microstructure of the plates in selected places is part of the verification of properties.

Of the other NDT tests, the penetration test (PT) was used for the detection of surface defects and the radiographic test (RT), which as the second volume method brings results directly comparable to the results of UT.

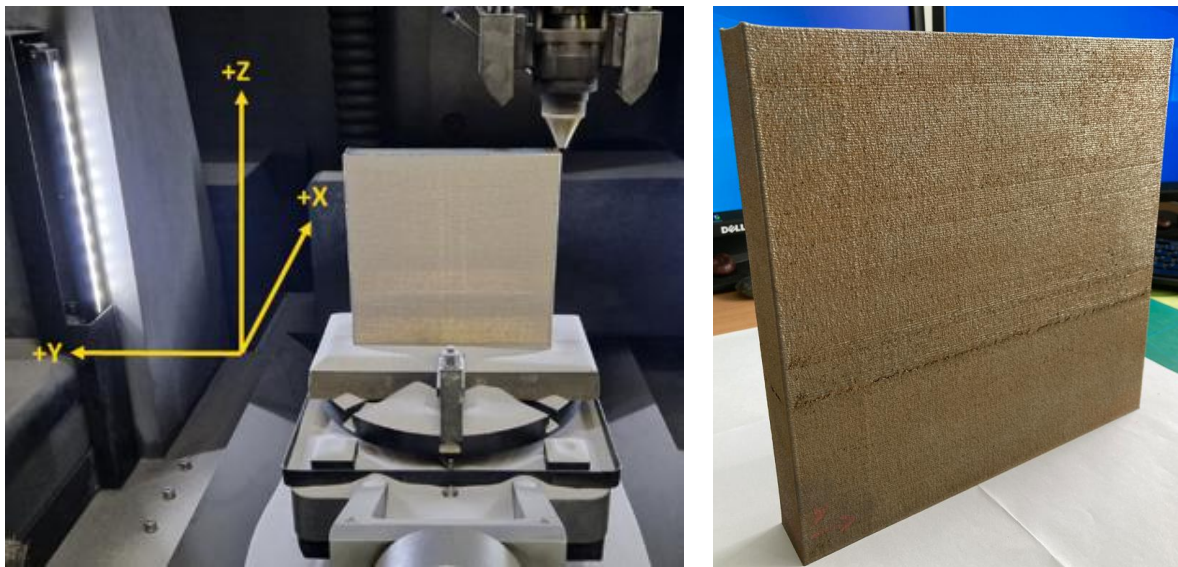
Úvod

V rámci projektu byly vytištěny technologií DED (Direct Energy Deposition) dvě desky z materiálů AISI 316L a A508. Oba typy materiálů slouží k ověření získaných vlastností materiálů podobných materiálům využívaných u heterogenních svarových spojů (HSS) na jaderných elektrárnách. Tištěné materiály mají sloužit k ověření optimalizaci postupu tisku, zjištění mož-

nosti aplikace metod nedestruktivního zkoušení se zaměřením na ultrazvukové vlastnosti a následně pro mechanické a metalografické rozборы. Vzorky tištěných desek dále budou sloužit k ověření svařitelnosti tištěné a konvenčně vyrobené oceli pro možnost opravy stávajících HSS.

Zkušební desky

V tištěné podobě mají desky rozměr 255×255×35 mm, obr. 1. Pro tisk nerezové desky byl použit prášek korozivzdorné oceli AISI 316L od f. Sandvik s velikostí částí 53-150 mikronů. Platforma pro depozici byla také z materiálu 316L a celý tisk trval 72 hodin s několika přerušováními zhruba po 6-7 hodinách z důvodu doplňování prášku do zásobníku tiskárny. Pro tisk desky z uhlíkové oceli byl použit prášek oceli A508 se stejnou velikostí částí od stejného dodavatele. Obě desky byly ke zkouškám dodány ve stavu po tepelném zpracování.



Obr. 1: Zkušební deska AISI 316L (vlevo) a A508 (vpravo)

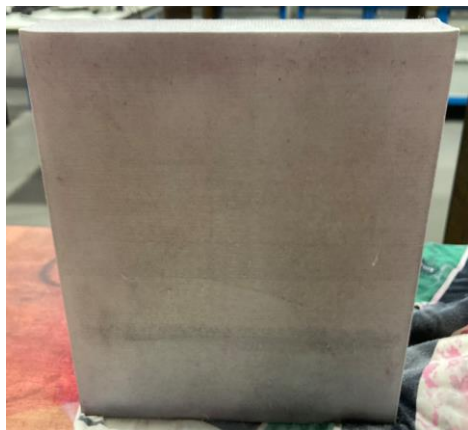
Nedestruktivní zkoušky desky AISI 316L

Na desce byly vizuálně patrné jednotlivé tištěné vrstvy o tloušťce 0,6 mm a také vrstvy, kdy došlo z důvodu doplňování materiálu k pozastavení tisku.

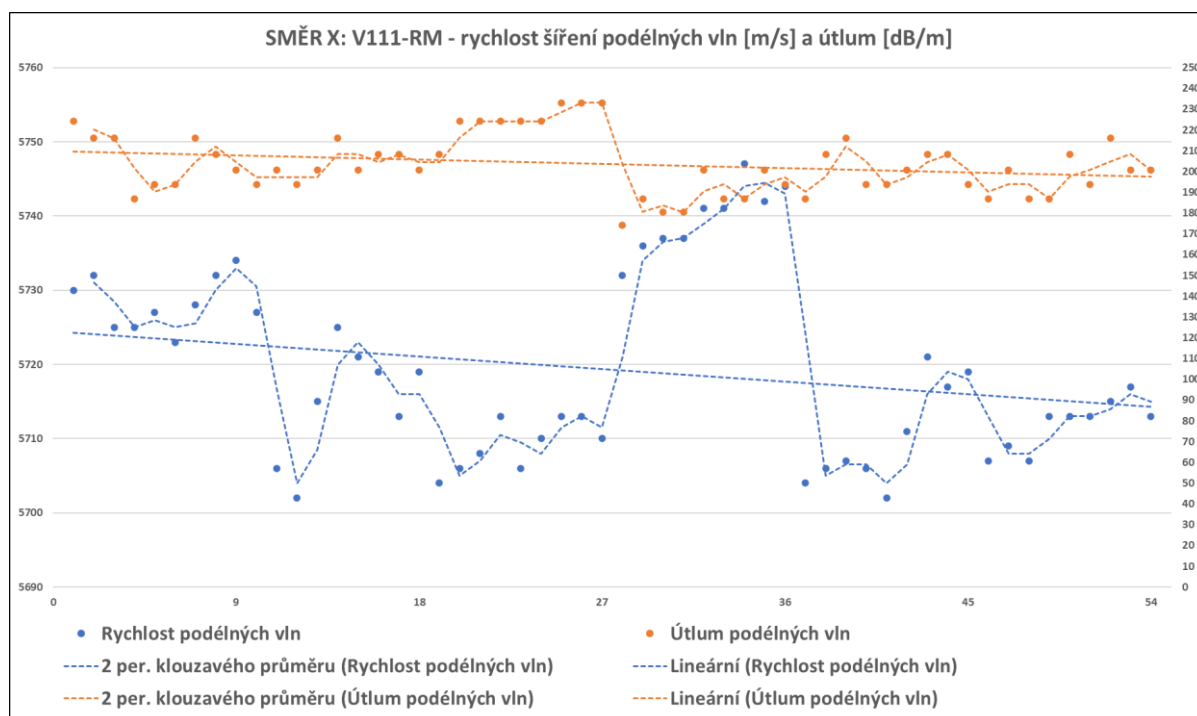
Ve stavu po tisku bylo provedeno 3D měření geometrie desky s cílem ověřit případně vzniklé deformace v jednotlivých osách se zjištěním maximální měřené odchylky od ideální roviny, bez uvažování bodů v blízkosti platformy, v rozsahu -0,069 / +0,102 mm.

Penetrační zkouška (PT) bez ohledu na drsnost povrchu překračující požadovaný limit $Ra < 3,2$ mm byla provedena na desce v dodaném stavu, obr. 2. Na povrchu nebyly zjištěny vady typu lineárních indikací (trhlin) ani výrazná porozita. Deska byla následně opracována na rozměr 250×250×30 mm a zkouška PT byla opakována se stejným výsledkem.

Ultrazvuková zkouška (UT) technikou Pulse-Echo byla provedena přístrojem Epoch 650. K dispozici byly 2/3 desky k měření rychlosti šíření ultrazvuku a útlumu ve všech třech osách. Celkem bylo měřeno v 54 bodech (X), 6 (Y) a 9 (Z) jednotlivých os, body byly značeny od platformy. Ve všech třech osách bylo možné měřit pouze podélnými vlnami a příčnými vlnami pouze v ose X (nejmenší tloušťka / dráha pro ultrazvuk) a to i přesto, že bylo testováno více druhů sond s různými frekvencemi. Vyhodnocení měření v ose X vedlo ke zjištění oblasti s mírně odlišnou rychlostí ultrazvuku a stejně tak s vyšším útlumem, obr. 3. Oblasti byly na desce vyznačeny a následně podrobeny metalografickému rozboru, kde byl zjištěný zvýšený výskyt porozity. Mikrostruktura desky je dokumentována na obr. 4. Při měření technikou phased array bez enkodéru nebyly detekovány žádné vnitřní vady s náhradní velikostí 2 mm a větší.

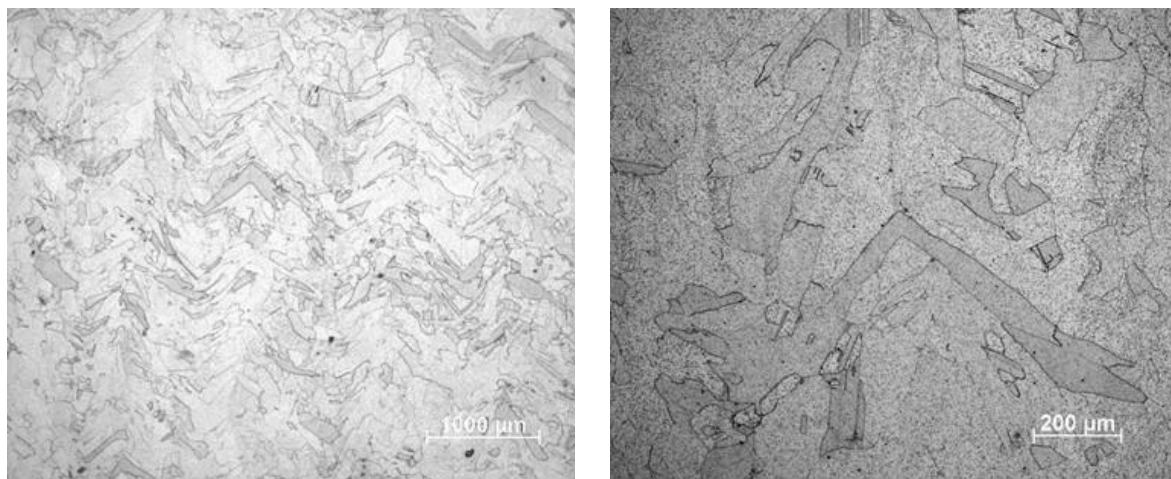


Obr. 2: Penetrační zkouška desky AISI 316L (po tisku vlevo, po opracování vpravo)

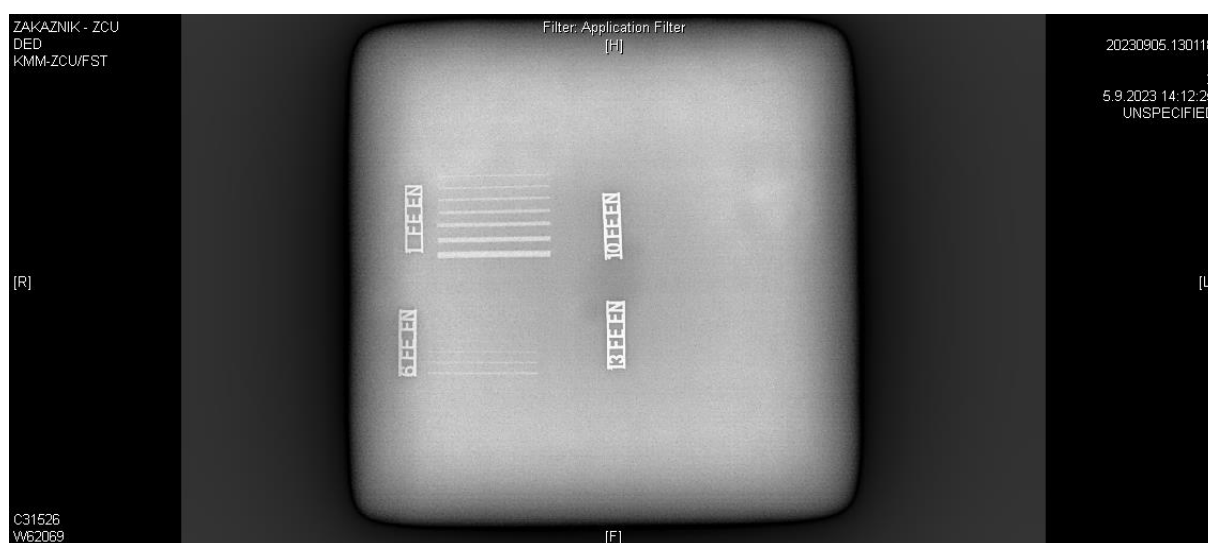


Obr. 3: UT vlastnosti desky AISI 316L v ose X, podélné vlny

Deska byla ve stavu po tisku také podrobena rentgenové zkoušce (RT) a nebyly nalezeny žádné indikace vad, obr. 5. Výsledek srovnávací objemové metody NDT odpovídá výsledkům UT při měření technikami Pulse-Echo a phased array, které byly provedeny po opracování povrchu.



Obr. 4: Metalografie desky AISI 316L v ose XY (vlevo zv. 25x, vpravo 100x)



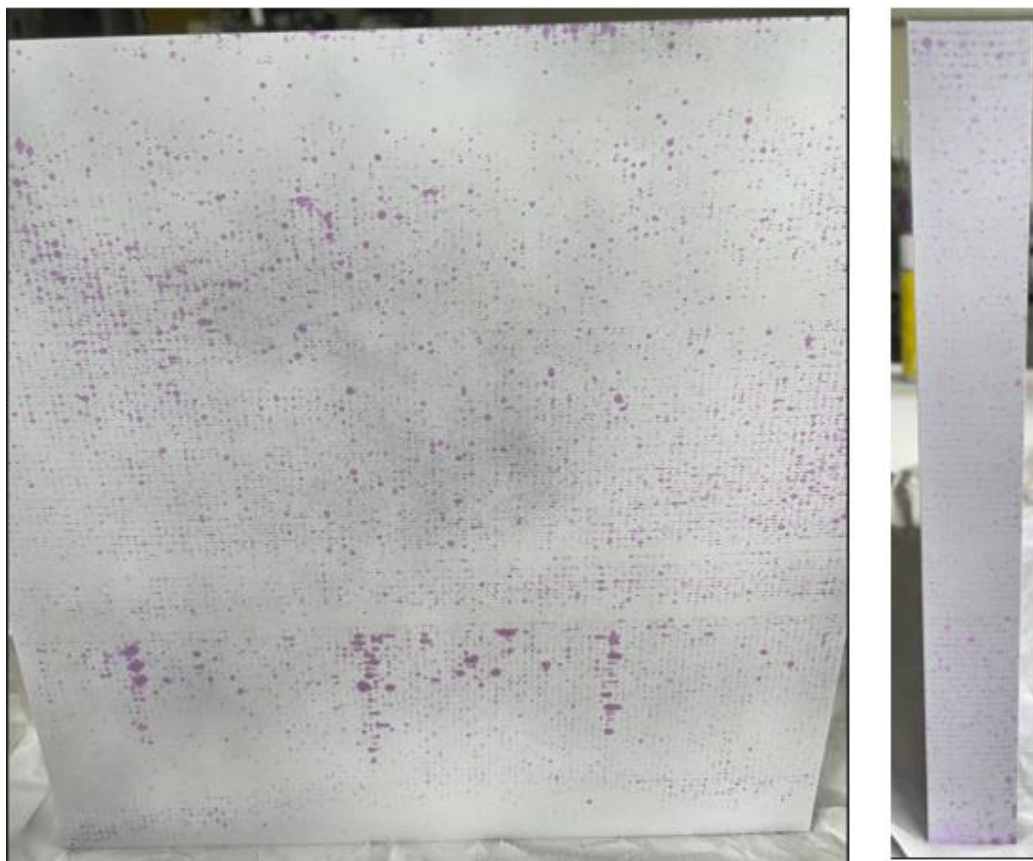
Obr. 5: RT desky AISI 316L

Nedestruktivní zkoušky desky A508

Druhá deska tištěná z uhlíkové oceli byla podrobena vizuální kontrole ve stavu po tisku, kdy byly opět vizuálně patrné jednotlivé tištěné vrstvy o tloušťce 1 mm a byla patrná místa přerušení tisku z důvodu doplňování prášku.

Po opracování byl celý povrch desky kontrolován na přítomnost povrchových indikací barevnou PT a výsledky z čelních stran jsou dokumentovány na obr. 6, kde je patrný četný výskyt pórů po 20 minutách vyvíjecího času.

Na desce byly dle výkresu po opracování na rozměr 250×250×30 mm vyznačeny měřicí body v rovinách X, Y a Z. Celkem bylo vyznačeno 81 (X), 9 (Y) a 9 (Z) bodů v nichž bylo provedeno 3D měření tloušťky a hodnoty byly použity pro měření rychlosti šíření vln při ultrazvukovém zkoušení.

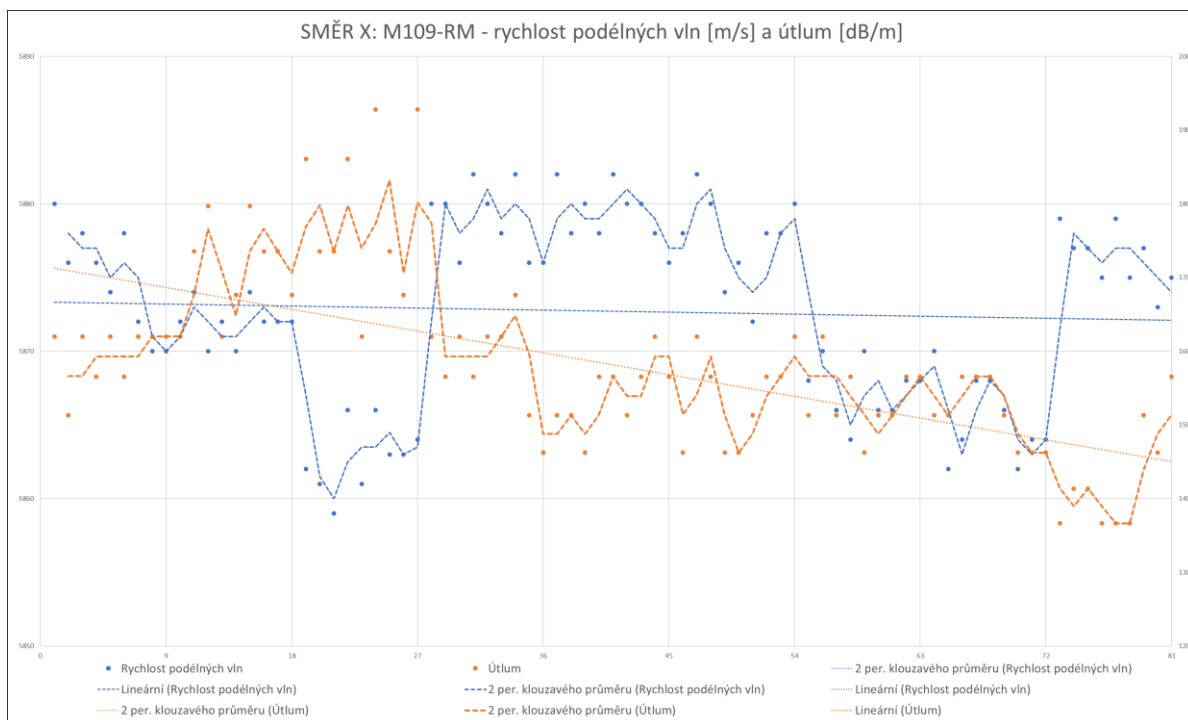


Obr. 6: PT desky A508

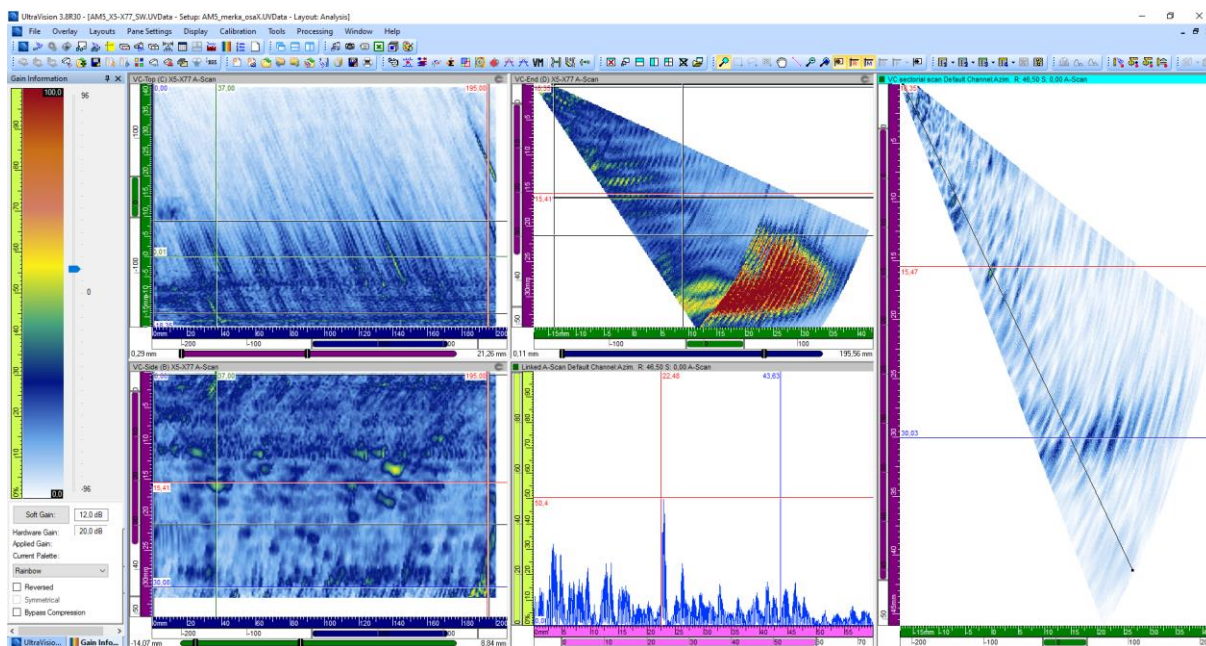
Ultrazvuková zkouška technikou Pulse-Echo byla provedena přístrojem Epoch 650 a k měření rychlosti šíření ultrazvuku a útlumu ve všech třech osách byly použity vybrané přímé sondy podélných i příčných vln o frekvenci 5 MHz. Podélnými i příčnými vlnami bylo možné provést měření ve všech třech osách. Vyhodnocení měření rychlosti šíření ultrazvuku společně s útlumem α v materiálu v ose X je graficky znázorněno pro sondu podélných vln c_L na obr. 7. Z výsledků je patrné, že v oblasti řad X19-X27 došlo k poklesu rychlosti a současně nárůstu útlumu, stejně je tomu u dvou řad X55-X72. Oblasti byly vyznačeny pro následný metalografický rozbor. Ve zbylé části desky je rychlost podélných vln beze změny, s mírným poklesem útlumu. U příčných vln byla zaznamenána skoková změna rychlosti i útlumu u řady X19-X27 (shoda s podélnými vlnami) a útlum mírně klesá směrem od platformy ve směru tisku. Vyhodnocením měření v ose Y pro obě sondy podélných i příčných vln byl zjištěn trend mírného poklesu rychlosti u obou typů ultrazvukových vln směrem od platformy ve středové oblasti desky. Charakter průběhu poklesu rychlosti podélných vln je kopírován průběhem útlumu, naopak u příčných vln došlo k růstu útlumu směrem od platformy.

Vyhodnocením měření v ose Z sondou podélných vln došlo směrem od platformy k nevýraznému poklesu rychlosti a mírnému nárůstu útlumu. U rychlosti příčných vln je pokles směrem od platformy také nevýrazný a útlum vyrovnaný ve všech měřených bodech.

Při měření ultrazvukových parametrů v bodech X byl zaznamenán v mnoha místech výskyt vadových ech, dle echodynamiky lze soudit na porozitu, což odpovídá nálezům při PT. Ultrazvuková kontrola desky technikou phased array bez enkodéru byla provedena maticovou sondou s frekvencí 5 MHz s klínem podélných vln. Měření bylo realizováno ve směru osy tisku Z mezi body X5-X77, obr. 8 a body X9-X81, v kolmém směru ve směru osy Y mezi body X45-X37.



Obr. 7: UT vlastnosti desky A508 v ose X, podélné vlny



Obr. 8: UT phased array mezi body X5-X77 – vadové indikace v hloubce 15,5 mm

V tab. 1 jsou uvedeny rozsahy měřených rychlostí obou typů vln a jejich útlumy, pokud jsou měřitelné.

Tab. 1: Ultrazvukové vlastnosti tištěných desek AISI 316L a A508

UT parametry	AISI 316L					
	ve směru osy X		ve směru osy Y		ve směru osy Z	
	bez TZ	s TZ	bez TZ	s TZ	bez TZ	s TZ
c_L	5612-5739	5702-5747		5547-5666		5690-5738
c_T	2959-3043	3048-3170				
l_L	182-330	174-233		20-32		25-35
l_T	151-222	157-263				

A508						
UT parametry	ve směru osy X		ve směru osy Y		ve směru osy Z	
	bez TZ	s TZ	bez TZ	s TZ	bez TZ	s TZ
c_L	5601-6094	5859-5882	5724-5866	5833-5858	5742-5755	5827-5838
c_T	3169-3208	3199-3218	3108-3222	3188-3218	3159-3216	3186-3197
l_L	147-193	137-193	46-62	19-28	54-90	33-34
l_T	68-137	54-168	43-73	15-20	60-95	21-27

Závěr

Nerezová tištěná ocel je při větších drahách pro ultrazvuk (ve směru os Y a Z) ve stavu po TZ neprozvučitelná příčnými vlnami. Pro srovnání na desce bez TZ nebylo možné měřit ani sondami podélných vln. Ve směru osy X je patrný rozdíl mezi stavem bez a s TZ, kdy po TZ se podstatně zužuje rozsah rychlosti podélných vln a rozsah naměřených rychlostí příčných vln roste a posouvá se k vyšším hodnotám. Z pohledu útlumu ve stavu materiálu po TZ došlo k nárůstu měřeného rozsahu útlumu příčných vln.

U uhlíkové oceli A508 bylo možné provést měření rychlosti podélných i příčných vln a jejich útlumů ve všech osách, a to ve stavu bez i s tepelným zpracováním. Ve směru osy X je patrný vliv TZ na zúžení rozsahu měřených rychlostí podélných vln a ve všech osách je patrný jejich posun k vyšším hodnotám, zatímco vliv TZ na příčné vlny není z pohledu rychlostí tak významný. V osách Y a Z je patrný vliv TZ na podstatné snížení útlumu materiálu.

Poděkování

Tento výsledek vznikl díky statní podpoře Technologické agentury ČR v rámci programu Národního kompetenčního centra II, u projektu TN02000012 „Centrum pokročilých jaderných technologií II“.

Reference

- [1] *Advanced Nuclear Technology: Additive Manufacturing Roadmap for the Nuclear Power Plant*. Palo Alto, CA, EPRI, 2020, technical report, 3002018276.
- [2] *Ultrasonic Testing (UT) and Computed Tomography (CT) Comparative Scanning of Proposed Additive Manufacturing Reference Standard*. Palo Alto, CA, EPRI, 2022, technical report, 3002025338.
- [3] VESELÁ, Jana, BENEŠ, Petr a ZAHRÁDKA, Pavel. *CANUT II DP_02_02_01 – Výsledky NDT AM desky 316L za rok 2023*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., prosinec 2023, technická zpráva, PL5014.
- [4] VESELÁ, Jana. *CANUT II DP_02_02_01 - výsledky UT AM desky 316L DED bez tepelného zpracování*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., květen 2024, technická zpráva, PL5295.
- [5] VESELÁ, Jana a MAREŠ, Pavel. *CANUT II DP_02_02_01 - výsledky UT AM desky A508 DED bez tepelného zpracování*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., červen 2024, technická zpráva, PL5342.
- [6] VESELÁ, Jana a MAREŠ, Pavel. *CANUT II DP_02_02_01 - výsledky UT AM desky A508 DED*. Plzeň, Centrum výzkumu Řež s.r.o., červenec 2024, technická zpráva, PL5344.

ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI ENERGETICKÝCH A ZPRACOVATELSKÝCH ZAŘÍZENÍ POMOCÍ POKROČILÝCH POVLAKOVÝCH SYSTÉMŮ

INCREASING THE LIFETIME AND RELIABILITY OF POWER AND PROCESS EQUIPMENT USING ADVANCED COATING SYSTEMS

Jakub Antoš

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Energetická a zpracovatelská zařízení jsou vystavena náročným provozním podmínkám, které mohou zahrnovat vysoké teploty, mechanické namáhání, korozivní prostředí, působení chemikálií nebo synergie vícero zatěžovacích mechanismů. Tyto faktory významně ovlivňují jejich životnost a spolehlivost, což má přímý vliv na provozní náklady, servisní a odstávkové intervaly, bezpečnost a ekologickou zátěž. Jednou z klíčových metod, jak prodloužit životnost těchto zařízení anebo zkrátit či zefektivnit servisní anebo odstávkové intervaly, je použití moderních nátěrových systémů. Moderní pokročilé nátěrové systémy jsou zpravidla postaveny na polymerní pryskyřicích s inhibitory koroze, plnivem, nanočásticemi a dalšími aditivy. Tímto mixem přísad vznikají materiály, které se označují jako kompozitní nátěrové hmoty. Vhodnou volbou složení kompozitu lze docílit velmi přesných funkčních vlastností pro zajištění odolnosti proti velice široké paletě provozního zatížení. Kromě těchto organických polymerních nátěrových systémů existují hmoty na anorganické bázi – zejména keramické nebo kovo-keramické nátěrové hmoty, které jsou na rozdíl od hmot na bázi polymerů určeny zpravidla pro vysoko-teplotní aplikace, jako je ochrana teplosměnných ploch a kouřovodů proti erozi, korozním vlivům a tvorbě usazenin/nálepů/nápeků. V prezentaci bude představen náhled na některé současné trendy v oblasti nátěrových materiálů, metody aplikace a budou prezentovány ukázky z praxe.

Abstract

Energy and process equipment are exposed to demanding operating conditions that may include high temperatures, mechanical stress, corrosive environments, chemical exposure, or the synergy of multiple loading mechanisms. These factors significantly affect their service life and reliability, which has a direct impact on operating costs, service and downtime intervals, safety and environmental impact. One of the key methods to extend the life of these devices and/or to shorten and/or make the service and/or downtime intervals more efficient is the use of modern coating systems. Modern advanced coating systems are usually built on polymer resins with corrosion inhibitors, fillers, nanoparticles and other additives. This mix of ingredients creates materials that are referred to as composite coatings. By choosing the appropriate composition of the composite, exact functional properties can be achieved to ensure resistance to an extensive range of operating loads. In addition to these organic polymer coating systems, there are substances on an inorganic basis – especially ceramic or metal-ceramic coating substances, which, unlike polymer-based substances, are usually intended for high-temperature applications, such as the protection of heat exchange surfaces and flues against erosion, corrosion and formation deposits/buildups/slugs. The presentation will provide an overview of some current trends in the field of coating materials, application methods, and examples from practice will be presented.

MOBILNÍ PODPORA PRO DIAGNOSTIKU KOMPONENT ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ ČEZ

MOBILE SUPPORT FOR DIAGNOSTICS OF CEZ ENERGY EQUIPMENT COMPONENTS

Pavel Cvešpr

I&C Energo a.s., Divize 3200 – INŽENÝRING

Abstrakt

Diagnostika komponent energetických zařízení ČEZ byla téměř 23 let provozována desktopovou aplikací LTOs, která mimo jiné prováděla sběr dat především pomocí protokolů ve formátu MS Word a MS Excel. Zvyšující se náročnost údržby diagnostických protokolů byla dána zhoršující se dostupností maker zejména s ohledem na bezpečnostní politiku systému MS Office. S každou změnou verze MS Office bylo potřeba dosavadní protokoly revidovat a zkontrolovat, zda nedošlo k omezení funkčnosti a generování chyb.

Uvedené důvody daly impuls k vývoji a zprovoznění mobilní podpory ke sběru dat, která výše popsany problém zcela eliminuje. Tento systém umožňuje sběr dat pomocí mobilního zařízení přímo v terénu a nabízí uživateli možnost pořídit fotodokumentaci rovnou do staženého protokolu.

Protokoly jsou vytvořeny v podobě třívrstvé architektury (databáze DB Oracle, aplikační vrstva – Aplikační server, prezentační vrstva – Webový server). Prezentační vrstva, instalovaná na webový server, obsahuje tenkého klienta, zobrazeného přes standardní webový prohlížeč, s možností provozu na mobilních zařízeních (může být i samostatný klient) a podporou provozu v off-line režimu.

Abstract

For almost 23 years, the diagnosis of CEZ power equipment components was operated by the LTOs desktop application, which, among other things, collected data primarily using protocols in MS Word and MS Excel format. The increasing complexity of maintenance of diagnostic protocols was caused by the deteriorating availability of macros, especially with regard to the security policy of the MS Office system. With each update of the MS Office version, it was necessary to revise the existing protocols and check whether there were any restrictions on functionality and if the protocol generated errors.

The stated reasons gave impetus to the development and operation of mobile support for data collection, which completely eliminates the problem described above. This system enables data collection using a mobile device directly in the field and offers the user the opportunity to take photo documentation directly into the downloaded protocol.

Protocols are created in the form of a three-layer architecture (DB Oracle database, application layer – Application server, presentation layer – Web server). The presentation layer, installed on the web server, contains a thin client, displayed through a standard web browser, with the possibility of operation on mobile devices (it can also be a separate client) and support for operation in off-line mode.

Mobilní podpora pro diagnostiku komponent

Diagnostická a revizní činnost představuje důležitou část péče o zařízení v provozech skupiny ČEZ. Jejím provádění je věnována velká pozornost a prostředky. Pro tyto účely sloužil více než 10 roků software LTOs, který fungoval ve formě tlustého klienta na uživatelské stanici a data sbíral do externích souborů.

S postupem času a vývojem technologií bylo rozhodnuto o nahrazení původní metody sběru dat pro diagnostické a revizní protokoly, které historicky probíhaly ve vyplňování dokumentů Word a Excel. Touto formou se do informačního systému LTOs ukládalo do roku 2023 cca 20000 protokolů ročně.

Tento přístup představoval překážku s ohledem na rozvíjející se požadavky na bezpečnost a také na udržitelnost protokolů. Proto došlo k návrhu a následné realizaci mobilní podpory pro diagnostiku komponent elektrozařízení ČEZ. Systém byl přenesen do online prostředí (s možností offline režimu pro sběr dat) a byl postaven jako třívrstvá aplikace s řízeným přístupem.

Nová mobilní podpora nabízí široké možnosti přizpůsobení pro sběr různých dat a lze je customizovat pro různé provozy, aplikace je konfigurovatelná i pro další odvětví a požadavky zákazníka.

Příprava protokolu

Samotný koloběh protokolu začíná požadavkem na diagnostiku nebo revizi, který je vygenerován v rámci ročního plánu na základě parametrů definovaných v programu údržby. Alternativně jsou také požadovány kontroly ad-hoc, které nejsou součástí ročního plánu.

Tato příprava probíhá v aplikaci PSK, modul LTO. Aplikace je připravena vygenerovat protokol podle požadavku uživatele, dodat mu základní obrysy (struktura protokolu, jednotlivé sekce, dodavatelská firma, případně zpracovatel) skrze přednastavenou šablonu (ta se liší pro jednotlivé protokoly). S tímto polotovarem je protokol následně odeslán do aplikace Chytrých protokolů, kde dochází k dalším krokům z workflow protokolu.

Samostatná agenda Chytré protokoly umožňuje kromě sběru dat také řízenou kontrolu/korekci uložených dat například štitkových údajů u zařízení, evidenci zjištěných závad při provádění diagnostik/kontrol/revizí a při uložení protokolu také odepsání realizovaných činností z ročního plánu. Pokud má daný protokol implementována pravidla tzv. autohodnocení, je uživateli usnadněna práce s posouzením dat zadaných přímo do tabulek protokolu.

V systému PSK (Provozní Systém Klasických elektráren) je vytvořena specifická šablona protokolu pro každou metodu (diagnostickou činnost).

The screenshot shows the PSK-LTO software interface. The main window is titled 'Generování protokolů' (Protocol Generation). It contains a table with columns: Gene, Měsíc, Rok, Termin, Číslo kontroly, ID činnosti, Číslo PP, Metoda, Název metody, Číslo prot. (poslední), and Hodnocení prot. (poslední). A modal window 'Výběr šablony protokolu' (Protocol Template Selection) is open, showing a list of templates with columns: Kód, Název, and Zpracovatel. The selected template is 'Zpráva o provozní revizi tlakové nádoby' (Report on operational inspection of a pressure vessel). The interface also shows a sidebar with various navigation options like 'Zařízení', 'Dokumenty', 'Provozní hodiny', 'Odhodnocení', 'IA vrstva - zařízení', 'IA vrstva - otázky', 'Plánování', 'Program', 'Roční plán', 'Nastavení', 'Plánované odstávky', 'Protokoly', 'Generování protokolů', 'Seznam protokolů', 'Číselníky', 'Diagnostika', 'Diagnostika TZ', 'Materiálová diagnostika', 'Odsíření', 'Transformátory', 'Točivé stroje - elektro', 'Vibrodiagnostika', 'Měření', 'Roční hodnocení', 'Statistiky', 'DKZ', 'Veličny DKZ', 'Nádrže', 'Měřidla', 'Vnitřní revize kotle', 'Zvláštní procesy', 'Ostatní', 'Stavební konstrukce', and 'Svady a neshody'.

Obr. 1: Generování protokolu předchází výběr metody (činnosti)

Práce s protokolem

Po vytvoření požadavku na protokol v externí aplikaci dochází k samotnému zpracování protokolu. K tomuto účelu je vytvořena aplikace Chytré protokoly, která umožňuje naplnit protokol statickými daty udržovanými jako popisné údaje v registru zařízení, požadovanými daty historickými a předat tento protokol ke zpracování uživateli.

V rámci aplikace je uživateli zobrazeno menu dle nastavených oprávnění. Jednotlivé role a oprávnění tak lze dělit rozdílně například pro interní pracovníky a pro externí dodavatele, u nichž není žádoucí vstup do některých částí aplikace.

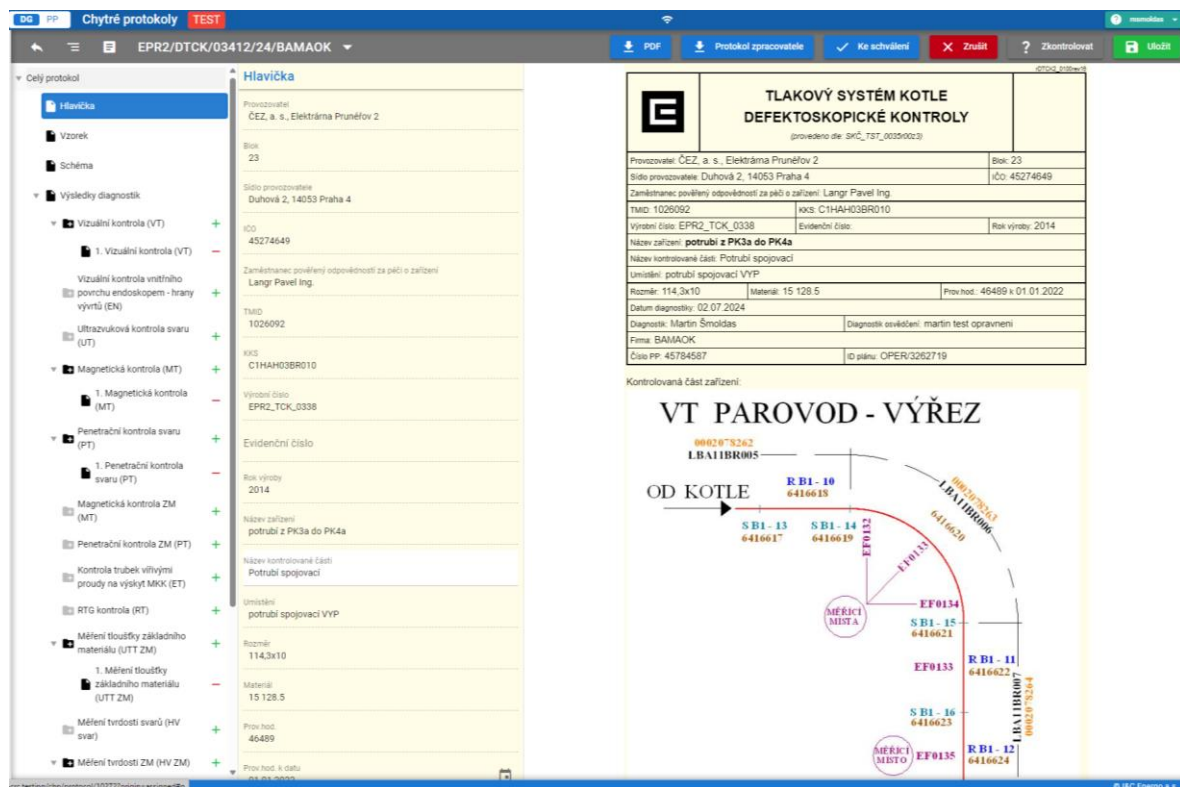
Chytré protokoly TEST											
Moje protokoly											
	Star	Elva	Blok	Měsíc	Název zařízení	Metoda	Výrobce číslo	Umístění	Správce POZ	TMD	Multi
☐	Vygenerován	EPO	50	7	Ohřívák ÚT	TTZ	290	VS EPO 6 - pod silem	szvolvoj (Svdl Wojciech Ing.)	1000008	☐
☐	Schválen	EPK2	23	7	potrubí z PK3a do PK4a	DTCK	EPK2_TCK_0338	potrubí spojovací VYP	mbauer (Miroslav Bauer)	1026092	☐
☐	Vygenerován	EPC	00	7	Výfah osobní 0,35 t	VOZ	C55H1566	Provozni budova / Z	molnarjan (Molnár Jan Ing.)	6009756	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDE	12	7	Vyhodnocovací jednotka plynoměru	M_PROFYL	99080012	F, Plyn před kotlem-INMAT	noskapet (Noska Petr Ing.)	7747950	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDE	12	7	Převodník tlakové difference	M_PROFYL	EDÉ_MER_4439	F, Plyn před kotlem-F+Rnžší Pd	noskapet (Noska Petr Ing.)	7747948	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDE	12	7	Převodník tlakové difference	M_PROFYL	7314344/0999	F, Plyn před kotlem-F+Rnžší Pd	noskapet (Noska Petr Ing.)	7747947	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDE	13	7	Vyhodnocovací jednotka plynoměru	M_PROFYL	00040006	F, Plyn před kotlem-INMAT	noskapet (Noska Petr Ing.)	7747954	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDE	13	7	Teploměr odporový s převodníkem externím	M_PROFYL	99-1293	T, Plyn před kotlem-INMAT	noskapet (Noska Petr Ing.)	7747953	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EPK2	23	7	potrubí z PK3a do PK4a	DTCK	EPK2_TCK_0338	potrubí spojovací VYP	langrav (Langr Pavel Ing.)	1026092	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EPK2	23	7	potrubí z PK3a do PK4a	DTCK	EPK2_TCK_0338	potrubí spojovací VYP	langrav (Langr Pavel Ing.)	1026092	☐
☐	Vygenerován	EPK2	23	7	potrubí z PK3a do PK4a	DTCK	EPK2_TCK_0338	potrubí spojovací VYP	msmoldas (Martin Šmoldas)	1026092	☐
☐	Ke schválení TKAD	EPC	12	7	Kouřovod Gagavo - ABS	ODS-DEPK			msmoldas (Martin Šmoldas)	6007020	☐
☐	Vygenerován	EPC	15	6	Potrubí ST výt.parovod od MPK5 k TG	POPK	EPC_POT_021		molnarjan (Molnár Jan Ing.)	6003850	☐
☐	Vygenerován	EDE	12	6	Potrubí K 2 - VT výt.parovod - kot.	POPK	EDÉ_POT_009	kotelna	kzubeckmar (Kzubeck Marian Ing.)	6003425	☐
☐	Vygenerován	EDE	12	6	Potrubí K 2 - VT výt.parovod - kot.	POPK	EDÉ_POT_009	kotelna	kzubeckmar (Kzubeck Marian Ing.)	6003425	☐
☐	Vygenerován	EDE	11	6	Potrubí K 1 - VT výt.parovod - kot.	POPK	EDÉ_POT_001	kotelna	kzubeckmar (Kzubeck Marian Ing.)	6003417	☐
☐	Vygenerován	ECH	13	4	rovnná část mezi 2 a 3 ohybem -2.část	REPLIKA	ECH_TCP_614	STP mezi MPK4P a Y kusem - levý	msmoldas (Martin Šmoldas)	6450287	☐
☐	K přepracování zářad	EPK1	13	3	TG 3	TPR	4365-6	13MAA00	msmoldas (Martin Šmoldas)	7000036	☐
☐	Vygenerován	ELE4	13	3	TG 3	REVEL	4365-6	13MAA00	prchalmar (Prchal Martin Ing.)	7000036	☐
☐	Vygenerován	EDA	13	12	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDA	13	10	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDA	13	11	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDA	13	9	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDA	13	8	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Přilázen zpracovatel	EDA	13	7	TG 3	VIB MER	4365-6	13MAA00	dosektom (Dosek Tomáš Bc.)	7000036	☐
☐	Vygenerován	EPO	13	2	TG 3	TVR	4365-6	13MAA00	msmoldas (Martin Šmoldas)	7000036	☐
☐	Uložení s podpisem	EPO	13	2	TG 3	TZT	4365-6	13MAA00	msmoldas (Martin Šmoldas)	7000036	☐
☐	Vygenerován	EPC	13	2	TG 3	E.TS	4365-6	13MAA00	msmoldas (Martin Šmoldas)	7000036	☐

Obr. 2: Úvodní obrazovka protokolů přihlášeného uživatele

Po vstupu do protokolu začíná uživatel vyplňovat postupně jednotlivé sekce protokolu. Tyto sekce jsou vždy definovány pomocí šablony protokolu a tímto je stanovena základní struktura protokolu. Uživatelé zde ovšem mohou pracovat s rozsahem sekcí – například více druhů měření, vyplnění různého rozsahu parametrů nebo také například zadání více nově objevených závad.

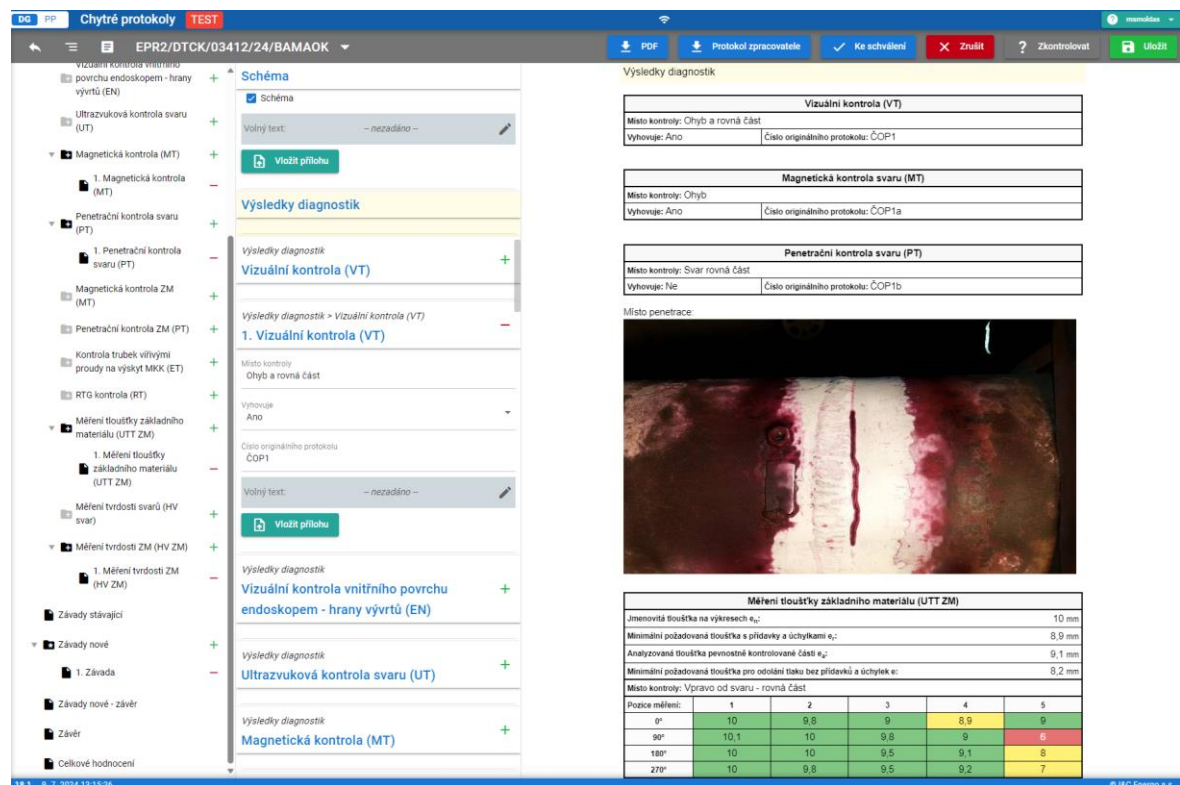
Ke všem sekcím je možno separátně přidávat poznámky, přílohy, dodávat výkresy, nahrávat obrázky. Tyto možnosti přispívají k maximální možné míře naplnění informací pro prováděnou činnost.

Tyto možnosti tak zvyšují rozsah sběru dat, který je možno provádět na různých technologiích a na různých typech diagnostik a revizí. Protokoly jsou schopny sbírat data pomocí předdefinovaných odpovědí, vyplňováním hodnot měření ale jsou také schopny sbírat fotodokumentaci kontrol, závad a dalších podstatných zjištění během diagnostik a revizí.



Obr. 3: Náhled na protokol (výběrová, editační a zobrazovací sekce)

Vyplněný protokol zpracovatel následně posouvá dál skrze schvalovací workflow. Následující kroky jsou definovány individuálně pro různé typy kontrol – revize a diagnostiky, aby došlo k reflexi odlišností různých kontrol.



Obr. 4: Náhled na protokol – automatické hodnocení měřené tloušťky značeno barevně

Postupně se tak k protokolu mohou vyjádřit i další relevantní osoby, které ho mohou například schvalovat, připomínkovat nebo vracet k přepracování.

V rámci aplikace je zde také přítomná administrace, která umožňuje administrátorům pracovat s protokoly nad rámec běžného rozsahu, který mají k dispozici zpracovatelé a kontaktní osoby dodavatelských firem.

Výkon TG: 284 MW	
Výrobce turbíny: SIEMENS	Výrobce generátoru: SIEMENS
Počet provozních hodin: 3669	Provozní efektivní hodiny: data

1. Rozsah kontroly

Název zařízení		Komponenta	Zkratka použitých metod	Hodnocení
GT 22 Plynová turbína	×	GT ložiska	NDT	B
	×	GT rotor	Defektoskopické kontroly	C
		GT rotor generátoru		nehodnoceno
		GT spalovací komora		nehodnoceno
	×	GT stator	Vizuálka	C
		GT 22 stator generátoru		nehodnoceno

Přílohy:

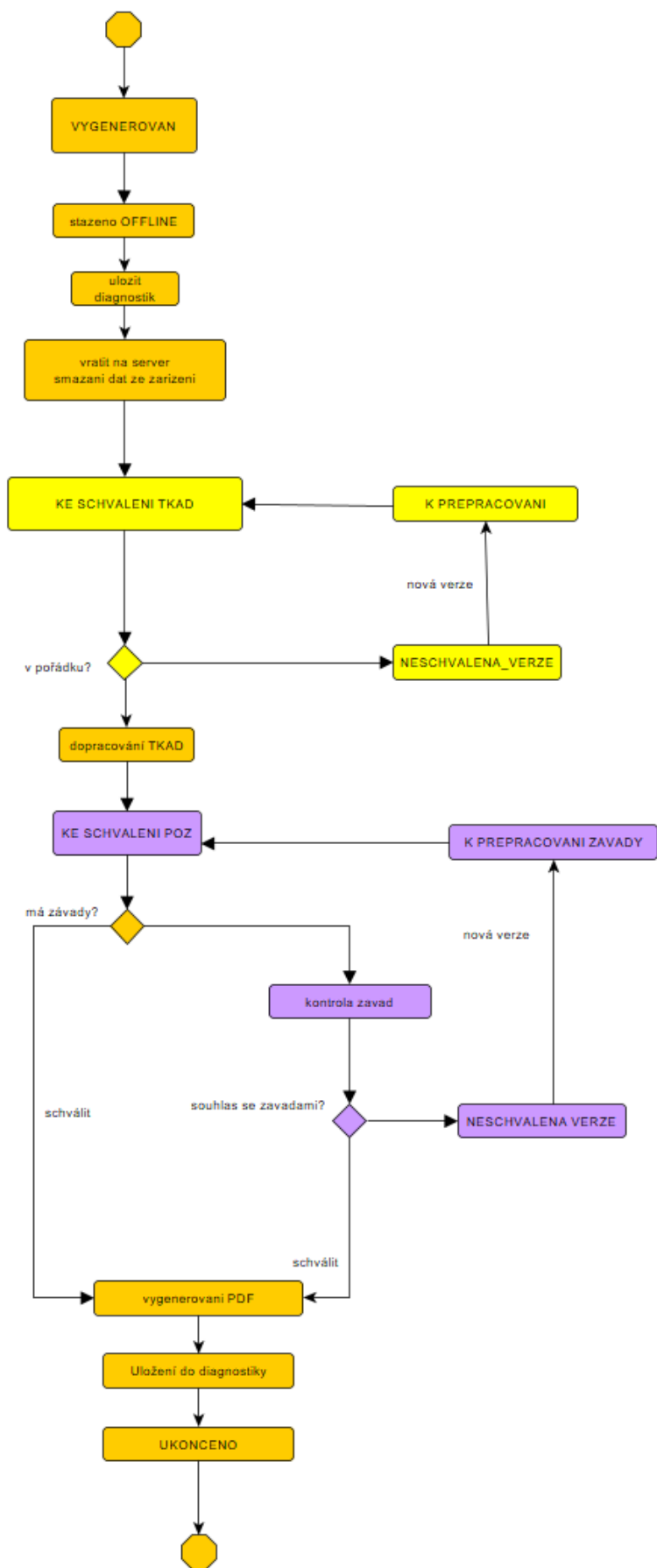
2024_03_1_10_40_55_zarizeni.xlsx

4. Nálezy

Číslo nálezu:		1
Lokalizace nálezu	Zařízení	GT 22 Plynová turbína
	Komponenta	GT ložiska
Typ nálezu/zjištění		Poškození od pracovního média a mechanických nečistot
Slovní popis nálezu		Stopy po zadírání na kompresorových RK2 (vyměněny, vymezeny vůle). Opsání na radiálních a axiálních ložiskách odpovídající provozu (zaleštěno). Mírně ojeté břity ol. ucpávek - běžný provoz.
Odkaz na původní protokol v příloze		
		Nálezy při prvním ohledání
		Ponecháno do dalšího provozu
Klasifikace nálezu	Závažnost: B	Závažnost: B

Číslo nálezu:		2	
Lokalizace nálezu	Zařízení	GT 22 Plynová turbína	
	Komponenta	GT rotor	
Typ nálezu/zjištění		Poškození od pracovního média a mechanických nečistot	
Slovní popis nálezu		Poškození keramického povlaku (eroze a lokální odloupenutí) RL turbíny (RL1 a 2 vyměněny, RL3 ponechány do dalšího provozu).	
Odkaz na původní protokol v příloze		1, 2 a 3	
		Nálezy při prvním ohledání	Ponecháno do dalšího provozu
Klasifikace nálezu	Závažnost: E		Závažnost: C

Obr. 5: Nálezy na vybraných komponentách při kontrole plynové turbíny GT 22 v EPC2



Obr. 6: Zjednodušené schéma procesu vyhotovení protokolu OFFLINE

Závada č.: 3

Vady materiálu

GT stator NDT statorových částí - nalezeny indikace na RL kompresoru v zámcích DR (opraveno zavřením a zabroušením). Vytlučení na těsnících plochách těsnících kruhů (zaleštěno). Indikace na těsnícím svaru mezi tělesy 2 a 3 (ponecháno do dalšího provozu)

Doporučení k nápravě:

Termín odstranění: 31.08.2026

Opětovná závada: ne

Termíny odstranění závad byly projednány se zaměstnancem pověřeným odpovědností za péči o zařízení.

Celkové hodnocení: C - Uspokojivý		
Poznámka k celkovému hodnocení: Během GO byla nalezena poškození a přesazení uvedená výše v protokolu. V rámci GO vyměněny RL na kompresoru na st 1-6 a disk st 15 a na turbíně RL stupně 1 a 2. Rovněž byl obnoven potah na lopatkách kompresoru st.0. Všechny závažné vady byly ošetřeny, menší vady (především u turbínových RL na st.3) jsou ještě přípustné a schopné dalšího provozu. Hodnocení C kvůli stavu potahu lopatek na třetím stupni a menším vadám ponechaným do dalšího provozu.		
Seznam příloh: Popis funkčnosti aplikace_AMS__rev_04.docx, 123.pdf, 456.pdf, 2024_03_1_10_40_55_zarizeni.xlsx, 2024_03_1_10_40_55_zarizeni.xlsx, 123.pdf		
Zprávu vypracoval: Cvešpr Pavel (QT)	Zprávu vyhodnotil za TKaD: Cvešpr Pavel (QT)	Zprávu převzala pověřená osoba: Cvešpr Pavel (QT)
Datum vypracování zprávy: 07.08.2024 09:58	Datum vyhodnocení zprávy: 07.08.2024 10:40	Datum předání (uložení): 07.08.2024 10:40
 el. podpis	 potvrzení o provedené kontrole pracovníkem TKaD	 potvrzení o zaslání elektronické notifikace pověřené osobě o uložení zprávy do systému

Přílohy:

123.pdf

456.pdf

Obr. 7: Závěrečná část Protokolu z kontroly TG již uloženého do PSK LTO

Závěr

Organizované uložení všech dat prostřednictvím PSK LTO do databáze zajišťuje jednotný přístup k informacím o technickém stavu zařízení, jeho provozu, údržbě a diagnostice. S možností napojení na datové zdroje okolních systémů poskytuje dostatek informací pro kvalifikované posouzení míry rizika vyplývající z provozování sledovaného zařízení okolo předpokládaného (projektovaného) roku jeho dožití.

Literatura

 [1] *Cílový koncept Provozní systém KE (PSK)*. id projektu 98430, I&C Energo a.s.

 [2] *Cílový koncept Chytré protokoly KE (PSK)*. id projektu P100996, I&C Energo a.s.

POZNATKY Z EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU ÚNAVOVÉ PEVNOSTI A ŽIVOTNOSTI SVAŘENCŮ S APLIKACÍ VYSOKOFREKVENČNÍHO MECHANICKÉHO ZPEVNŮVÁNÍ

FINDINGS FROM EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FATIGUE STRENGTH AND LIFETIME OF WELDS WITH THE APPLICATION OF HIGH FREQUENCY MECHANICAL IMPACT

Miloslav Kepka Jr. a Miloslav Kepka

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, výzkumné centrum RTI

Abstrakt

Pro zvyšování únavové pevnosti a životnosti svařovaných spojů, vyrobených zejména z vysokopevnostních ocelí, se ukazuje jako perspektivní aplikace metody HFMI (High Frequency Mechanical Impact). Doporučení IIW (International Institute of Welding) bylo v posledních letech předmětem intenzivního experimentálního výzkumu v Regionálním technologickém institutu (RTI), výzkumném centru Fakulty strojní ZČU v Plzni. Příspěvek tyto výsledky prezentuje. Hodnotí také přínos metody HFMI při aplikaci na opravné svary a doporučuje další směry výzkumu.

Abstract

The HFMI (High Frequency Mechanical Impact) method proves to be a promising application for increasing the fatigue strength and service life of welded joints, made mainly of high-strength steels. In recent years, the IIW (International Institute of Welding) recommendation has been the subject of intensive experimental research at the Regional Technological Institute (RTI), a research center of the Faculty of Mechanical Engineering of the ZČU in Pilsen. The paper presents these results. It also evaluates the benefit of the HFMI method when applied to repair welds and recommends further research directions.

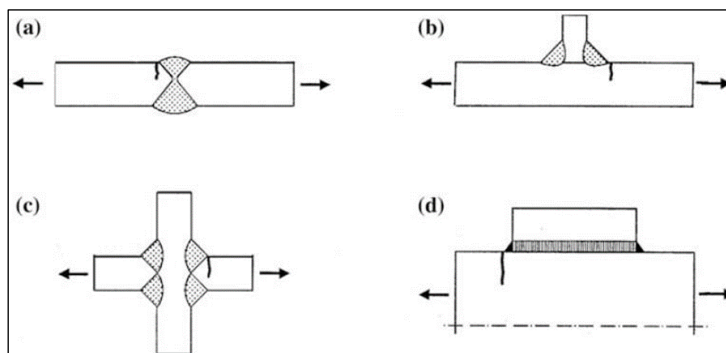
Úvod

HFMI je označení používané pro několik technologií pracujících na podobném principu. Liší se ve zdrojích energie, některé používají ultrazvukové piezoelektrické prvky, nebo magnetostrikční prvky a stlačený vzduch. HFMI je tedy souhrnný název pro: UIT – Ultrasonic Impact Treatment, UP - Ultrasonic Peening, UPT – Ultrasonic Peening Treatment, HiFIT – High Frequency Impact Treatment, PIT – Pneumatic Impact Treatment, UNP – Ultrasonic Needle Peening. Základní princip všech metod zůstává stejný. Indentor válcového tvaru je urychlován proti součásti nebo konstrukci s vysokou frekvencí (přibližně 90 Hz). Působící síla indentoru by se měla pohybovat v řádech kN. Aplikací metody HFMI se dosahuje lokálních změn v mikrostruktuře materiálu, v lokální geometrii svaru a vnáší se tlakové vnitřní pnutí do oblasti opracování svaru a jeho nejbližšího okolí. Působící indentory jsou vyrobené z vysokopevnostní oceli. Aby se dosáhlo kvalitního výsledku, mají indentory různé průměry a geometrie. Příklady používaných indentorů a schéma zařízení HiFIT pro aplikaci metody HFMI, kterým disponuje RTI, jsou na obr. 1.



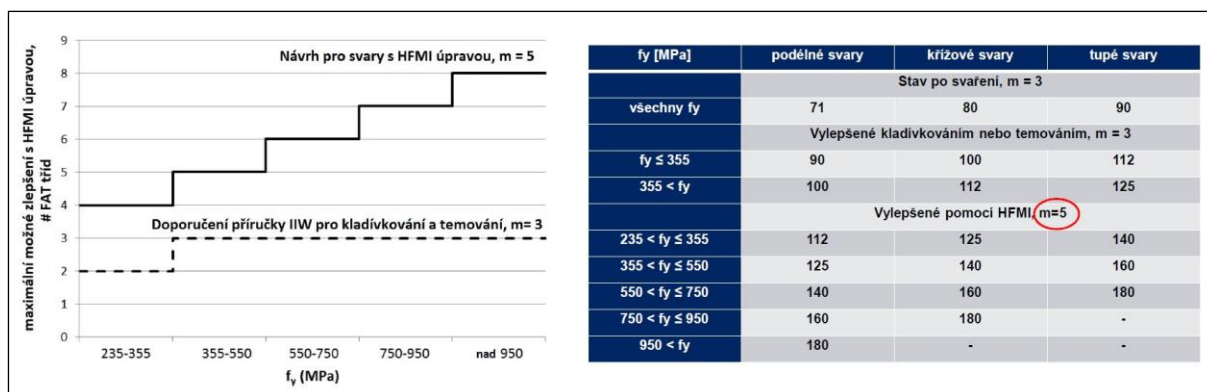
Obr. 1: Pneumatická pistole HiFIT a používané indentory [https://www.hifit.de/en/products]

Metoda HFMI je vhodná jak pro úpravy tupých, tak i koutových svarů a zvyšuje odolnost proti únavovým poruchám vycházející z paty svaru. Typy svarů, které jsou vhodné pro použití HFMI jsou zobrazeny na obr. 2.



Obr. 2: Příklady svarů vhodných pro aplikaci HFMI [1]

Dle doporučení IIW = International Institut of Welding [1] dojde ke zvýšení smluvní únavové pevnosti a posunu únavové S-N křivky směrem k vyšší životnosti (do kategorie svaru s vyšší únavovou pevností FAT). U oceli s mezí kluzu nižší než 355 MPa se úprava HFMI projeví zlepšením až o 4 třídy FAT. U oceli s mezí kluzu nad 355 MPa vede aplikace HFMI ke zlepšení o jednu další třídu FAT na každých 200 MPa zvýšení meze kluzu (f_y), viz obr. 3 převzatý z [2]. Pro výpočet únavové životnosti lze také počítat s mírnějším sklonem S-N křivek $m = 5$ místo $m = 3$, jak je obvyklé u běžných svarů při harmonickém namáhání bez úprav nebo upravených kladívkováním nebo temováním.



Obr. 3: Zlepšení FAT tříd pro svarů s HFMI úpravou [2]

Experimentální výzkum únavové pevnosti a životnosti svařenců s aplikací HFMI v Regionálním technologickém institutu (RTI), výzkumném centru Fakulty strojní ZČU v Plzni, byl motivován zmíněným doporučením [1]. Široká škála únavových zkoušek svařenců různých konfigurací byla realizována nejen v rámci interního výzkumu a studentských kvalifikačních prací, ale především v rámci projektů VaV financovaných Technologickou agenturou ČR (programy TREND a DOPRAVA 2020⁺). Následně jsou prezentované poznatky z těchto experimentálních aktivit.

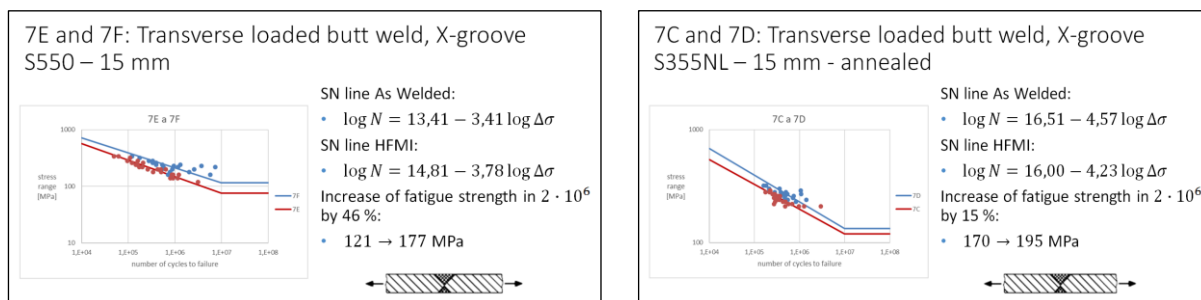
Výzkum ve spolupráci se ŠKODA TRANSPORTATION a.s.

Ve spolupráci se ŠKODA TRANSPORTATION se dokončuje ambiciózní testovací program, na jehož výstupu bude k dispozici cca 90 S-N křivek pro 3 konstrukční oceli používané při stavbě kolejových vozidel, 7 různých konfigurací svarů ve stavu bez a s aplikací HFMI vyrobených z plechů o 3 různých tloušťkách (4, 8 a 15 mm). Část zkušební matice znázorňují fotografie zkušebních vzorků na obr. 4.



Obr. 4: Fotografie zkušebních vzorků

Cílem zkušebního programu je připravit argumenty pro Drážní úřad. Tato autorita, která schvaluje uvedení kolejových vozidel do provozu, dosud neakceptuje použití metod, jako je např. kladívkování, pro zlepšení únavové pevnosti svarů. Příklad experimentálních výsledků prezentovaných v literatuře [3] je na obr. 5. Ze znázorněných výsledků je zřejmý příznivý účinek aplikace HFMI a výraznější zlepšení únavové pevnosti pro ocel vyšší pevnosti.



Obr. 5: Příklady S-N křivek stejných zkušebních vzorků bez aplikace a s aplikací HFMI vyrobených z různých ocelí

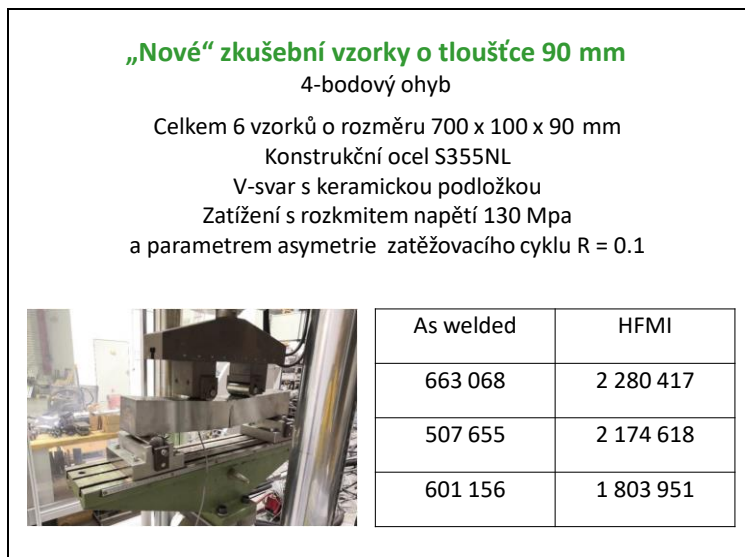
Již nyní bylo možno konstatovat následující závěry:

- výrobní společnost se již naučila používat HFMI;
- HFMI zlepšilo únavovou pevnost testovaných svařenců;
- byly pozorovány některé odlišnosti od doporučení IIW (např. sklony S-N křivek),
- tyto budou ještě podrobněji vyhodnoceny a konzultovány s autory doporučení IIW.

Výzkum ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT v Praze

Tento výzkum se zaměřil na svary plechů velkých tloušťek. Zkoumán též byl účinek HFMI na opravné svary.

Čtyřbodovým ohybem bylo testováno 6 tzv. „nových“ zkušebních vzorků o tloušťce 90 mm vyrobených z konstrukční oceli S355NL. Fotografie zkušebního stendu, parametry a výsledky únavových zkoušek vzorků bez aplikace HFMI (As welded) a s aplikací HFMI jsou součástí obr. 6.



Obr. 6: Fotografie zkušebního stendu a výsledky únavových zkoušek

Ve SVÚM a.s. bylo čtyřbodovým ohybem testováno 10 zkušebních vzorků o tloušťce 80 mm. Rozkmit zatížení byl tentokrát nižší než 130 MPa a na všech vzorcích bylo aplikováno přibližně 1 100 000 zatěžovacích cyklů. U 6 tzv. „starých“ zkušebních vzorků byly zjištěny únavové trhliny. To byla příležitost zabývat se v RTI únavovou životností opravných svarů. Fotografie procesu opravy svaru, parametry a výsledky únavových zkoušek vzorků s opravnými svary bez aplikace HFMI a s aplikací HFMI jsou součástí obr. 7.



Obr. 7: Fotografie procesu opravy svaru a výsledky únavových zkoušek

Také v tomto případě bylo možno konstatovat dílčí závěry:

- účinnost HFMI se potvrdila i na svarových spojích plechů velkých tlouštěk;
- únavová životnost se u prověřovaných zkušebních vzorků prodloužila více než 3x.

Zásadním poznatkem z tohoto pilotního ověřování bylo, že aplikací HFMI lze významně prodloužit únavovou životnost opravných svarů. Proto se této problematice podrobněji věnoval navazující interní výzkum.

Interní výzkum RTI

Práce [4] byla zaměřena na výzkum opravných svarů na ohýbaném T-vzorku s koutovými svary. Set-up experimentálního programu a jeho výsledky poskytují v informace uvedené na obr. 8 a obr. 9.

Výzkum opravných svarů na T-vzorku s koutovými svary



12 výchozích zkušebních vzorků of tloušťce 15mm

Základní materiál: Konstrukční ocel S460MC

Výroba zkušebních vzorků:

bodové svaření – kořenový svar – krycí svar – nařezání vzorků a jejich finální úprava.



Zatěžovací cyklus s rozkmitem zatěžovací síly ΔF .
Parametr asymetrie zatěžovacího cyklu $R \approx 0.17$.
Zatěžovací frekvence 10 Hz.

Vyhodnocení působícího „hot-spot“ napětí ze známé závislosti na působící zatěžovací síle.
Makrotrhlina v patě svaru identifikována ztrátou tuhosti zkušební vzorku (definované zvětšení deformace v místě působící síly).

Parametry svařování	Kořenová vrstva	Krycí vrstva
Svařovací napětí [V]	29,3	32,2
Svařovací proud [A]	232,4	255,4
Rychlost podávání drátu [m/min]	10,6	12,5
Přídavný materiál	G4Si1	
Ochranný plyn	Stargon C18	

Obr. 8: Proces výroby zkušebních vzorků a nakmitání únavové makrotrhliny

Průběh a výsledky únavových zkoušek

Výchozí zkušební vzorky

Vzorek	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	Počet cyklů do vzniku únavové makrotrhliny
1	6	0,86	10 000 000 (run out)
2	6	0,86	10 000 000 (run out)
3	6	0,86	10 000 000 (run out)
4	6	0,86	978 802
5	6	0,86	375 117
6	6	0,86	240 562
7	7	1	247 643
8	7	1	141 911
9	7	1	230 719
10	7	1	323 535
11	7	1	397 932
12	7	1	263 396



- Nedestruktivní zkoušky
- Vybroušení únavových trhlin
- Zavaření (kořenová a krycí vrstva)
- Očištění zkušebních vzorků
- HFMI na 5 vzorcích z 9 disponibilních
- Únavové zatěžování všech 5+4=9 vzorků

Zkušební vzorky s opravnými svary

Vzorek	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	Počet cyklů do lomu
6	6	0,86	579 158
8	7	1	367 616
10	7	1	247 212
12	7	1	454 683

Zkušební vzorky s opravnými svary + HFMI

Vzorek	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	Počet cyklů do lomu
4	6	0,86	2 924 106
5	6	0,86	10 000 000
7	7	1	1 872 460
9	7	1	10 000 000
11	7	1	10 000 000

Obr. 9: Výsledky únavových zkoušek

Z prezentovaných výsledků realizovaného programu plynou opět perspektivní závěry:

- na vhodných svařencích lze aplikací HFMI dosáhnout i vyšší únavovou životnost opravných svarů oproti svarům původním;
- únavová životnost se u prověřovaných zkušebních vzorků prodloužila více než 4x.

Návrh dalšího experimentálního výzkumu

Směry dalšího výzkumu potenciálu uplatnění metody HFMI jsou schematicky naznačeny na obr. 10.



Obr. 10: Návrh dalšího experimentálního ověřování potenciálu uplatnění metody HFMI

Uvedené náměty platí samozřejmě i pro oblast energetických strojů a zařízení. V tom případě se ale přidává ještě jedno téma a tím je testování účinnosti technologie HFMI za teplot, při kterých jsou energetické stroje a zařízení provozována.

Literatura

- [1] MARGUIS, Gary - BARSOUM, Zuheir. *IIW Recommendations for the HFMI Treatment: For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints*. International Institute of Welding, Springer, 2016.
- [2] BRTNÍK, Tomáš. *Vítězství nad vysokocyklovou únavou? HFMI – Nový způsob zpracování svarů vysokopevnostních ocelí*. Firemní prezentace SSAB, 5/2016.
- [3] KEPKA Jr., Miloslav et al. Experience with the use of the HFMI method for weldments from sheets of different thickness Experience with high-frequency mechanical impact method for weldments of sheets of different thicknesses. *Procedia Structural Integrity*, December 2024, vol. 57, p. 532-539.
- [4] KEPKA, Jiří. *Problematika oprav svařovaných spojů za použití metody HFMI*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2024, diplomová práce.

ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ SVARŮ PAROVODŮ

ULTRASONIC TESTING OF STEAM PIPE WELDS

Pavel Mareš a Jana Veselá

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Ultrazvukové zkoušení svarových spojů klasickou odrazovou technikou patří mezi nejběžnější metody využívané při zkoušení parovodů na klasických elektrárnách. Při realizaci této metody je velmi důležité znát přesnou geometrii svarového spoje a jeho okolí, a to i na vnitřním povrchu. To ale zejména u parovodů provozovaných několik desítek let může být problematické ať už z důvodu chybějící dokumentace mapující reálný stav nebo díky změnám způsobeným provozem. Komplikovat kontrolu UT technikami může například pokud vnitřní ovalita potrubí je montážně kompenzována vnitřní kalibrací s úkosem (např. 10°), což je běžná úprava a u válcovaných polotovarů využívána. Z tohoto důvodu byly na výřezu svaru parovodu provedeny zkoušky různými nedestruktivními metodami a technikami a navržena optimalizace postupu ultrazvukového zkoušení, která je v tomto příspěvku popsána.

Abstract

Ultrasonic testing of weld joints using the pulse echo technique is one of the most common methods used during inspection of steam pipelines at fossil power plants. When implementing this method, it is very important to know the exact geometry of the weld joint and its surroundings, including on the inner surface. However, this can be problematic, especially for steam pipelines that have been in service for several decades, either due to the lack of documentation mapping the real state or due to changes caused by service. It can complicate inspection by UT techniques, for example, if the internal ovality of the pipeline is compensated during assembly by internal calibration with a bevel (e.g. 10°), which is a common adjustment and used for rolled semi-finished products. For this reason, various non-destructive methods and techniques were tested on the steam pipe weld cut-out, and an optimization of the ultrasonic testing procedure was proposed, which is described in this paper.

Úvod

Pro správnou realizaci nedestruktivního zkoušení je potřeba mít co nejpresnější vstupní informace o zkoušeném kusu (rozměry, geometrii, materiál, výrobní postup, jeho historii atd.). Pokud některé klíčové informace nejsou k dispozici, je potřeba je získat jiným způsobem, např. využitím dalších metod a technik nedestruktivního zkoušení, které dokáží lépe zmapovat parametry zkoušeného dílu, nejčastěji svarového spoje. Ve většině případů se jedná o to, zda svarový spoj obsahuje nějaké geometrické úpravy (úkos na vnitřním povrchu, technologický neprůvar či jiné). Pokud tyto informace nejsou k dispozici nebo nejsou přesné může to vést k nesprávné interpretaci naměřených dat. To může v důsledku způsobit nemalé finanční ztráty ať v případě označení vyhovujícího kusu za nevyhovující nebo naopak. Proto byl navržen postup, jak v těchto případech postupovat a je v tomto článku nastíněn.

Svarový spoj komory přehříváku

Pro optimalizaci postupu ultrazvukového zkoušení byl vybrán svarový spoj komory přehříváku, který byl vyříznut na základě nevyhovujícího výsledku z realizace ručního ultrazvukového zkoušení (dle interpretace měl svarový spoj obsahovat trhliny na vnitřním povrchu do hloubky cca 5 mm a délky okolo 60 mm). Jednalo se o výřez potrubí s vnějším průměrem 219 mm a tloušťkou stěny 20 mm z materiálu 15128.5.



Obr. 1: Výřez vzorku

Po vyříznutí bylo provedeno ověření výsledků všemi dostupnými relevantními metodami. Pro zkoušení svarového spoje byly použity techniky ultrazvukového zkoušení PEUT (pulse echo), PAUT (phased array) a TOFD doplněné vizuální kontrolou VT kořenové oblasti svaru a na závěr byla provedena rentgenografická zkouška RT. Výsledky jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

Ultrazvukové zkoušení PEUT

Zkoušení bylo realizováno přístrojem Epoch 650 s využitím přímé sondy MB4F pro ověření tloušťky stěny potrubí a úhlové sondy MWB60-4 pro zkoušení svarového spoje. Pro lepší orientaci byla s PEUT současně provedena VT vnitřního povrchu a orientační proměření polohy jednotlivých vad.

Měření tloušťky lze provést v místech bez úkosu, kde je možné získat koncové echo (KE). Přístroj byl se sondou kalibrován na měrce K1 pro uhlíkovou ocel, rychlost šíření podélných vln je 5944 m/s. Zhruba 75 mm od nulového bodu bylo provedeno měření v axiální ose celkem v pěti místech, mimo oblast s úkosem a koruny svaru. Získané hodnoty tloušťky stěny trubky se pohybují v rozmezí 18,10 až 18,38 mm. Z hodnot je patrné, že trubka nedosahuje výkresového rozměru tloušťky stěny 20 mm. V místech s úkosem není možné získat KE, a tak v provozu by měření tloušťky stěny v blízkosti svarového spoje na vnějším povrchu potrubí mohlo sloužit k ověření přítomnosti úkosu: chybějící KE by ji potvrdilo. Zjištění úkosu v místě kořene svarového spoje by mělo vést k úpravě geometrie svaru při vyhodnocování výsledků NDT kontrol. Měřená délka úkosu 15 mm a znalost alespoň přibližného úhlu zešikmení 10° dle výkresu, obr. 4 se lze dopočítat, že tloušťka trubky v místě kořene svaru je o 2,6 mm menší, tzn. průměrná tl. $18,20 - 2,6 = 15,6$ mm.

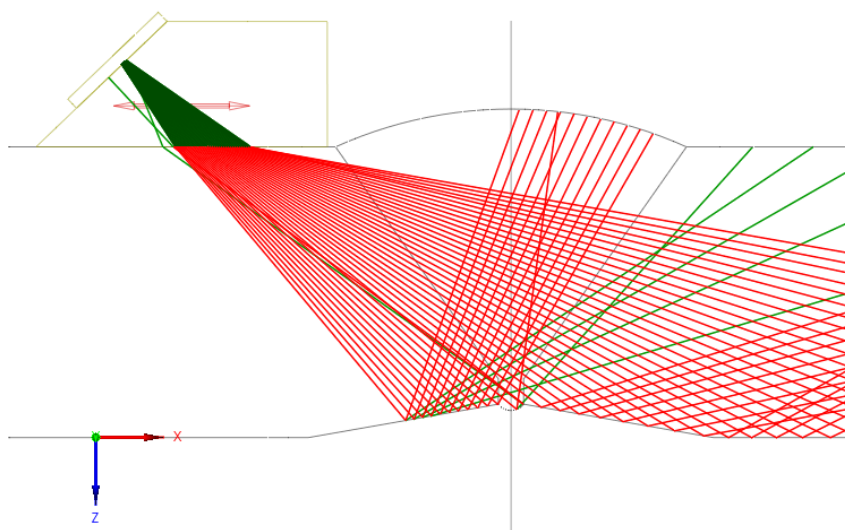
Na obr. 2 je uveden záznam z úhlové sondy MWB60-4 v místě indikace propadlého kořene, který se jeví jako indikace v hloubce 15,1 mm. V případě neznalosti přesné geometrie vnitřního povrchu může být mylně interpretována jako trhлина.



Obr. 2: Příklad indikace v oblasti kořene svarového spoje

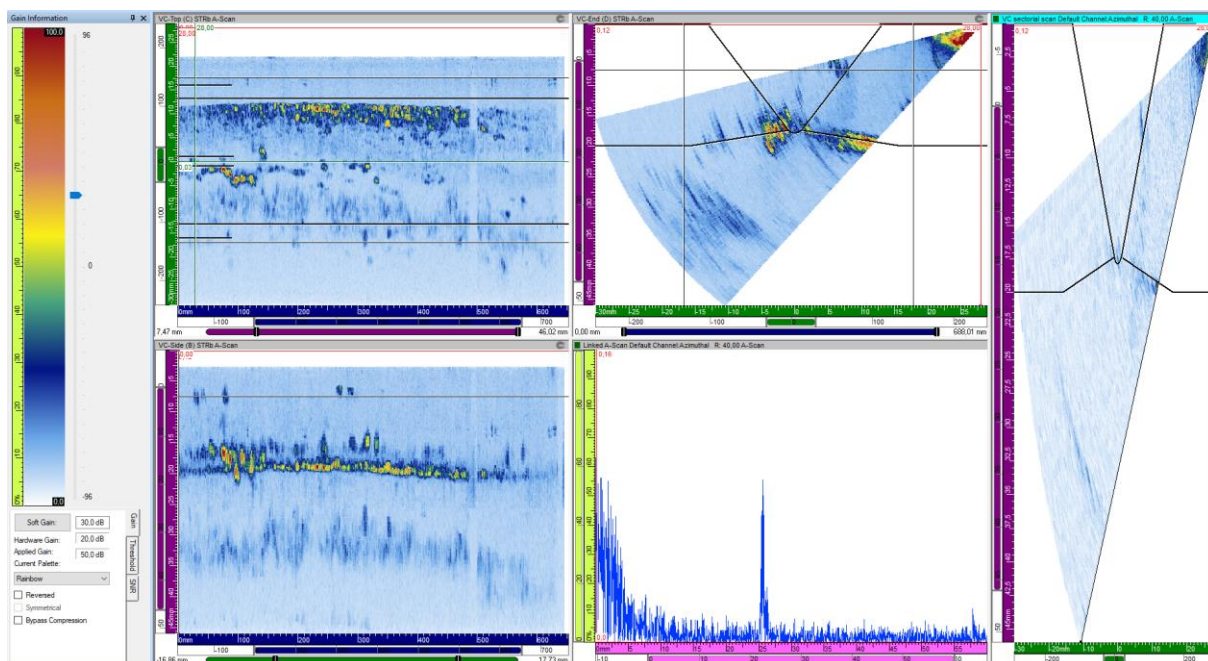
Ultrazvukové zkoušení PAUT

Ultrazvukové zkoušení bylo realizováno přístrojem Dynaray 128/128 PR, phased array son-
dou AM10 za použití vodní vazby a řetězového manipulátoru Olympus. Pro vyhodnocení mě-
ření, které bylo provedeno z obou stran svaru označených A a B byl využit SW Ultravision
3.8R30. Před zahájením měření byl simulován dopad svazku do kořenové oblasti svaru pomocí
SW CIVA, obr. 3. Z výsledků je patrné, že ultrazvukový svazek plně pokrývá zájmovou oblast
svaru a případné indikace z úkosu jsou detekovatelné.



Obr. 3: Simulace dopadu svazku do kořenové oblasti svaru s vnitřním úkosem

Na S-skenu je patrné, že výkresově zadaná geometrie svaru na všech pozicích přesně kopí-
ruje indikace od geometrie vnitřního povrchu. Na B-skenech jsou výrazné indikace v kořeni
svaru.

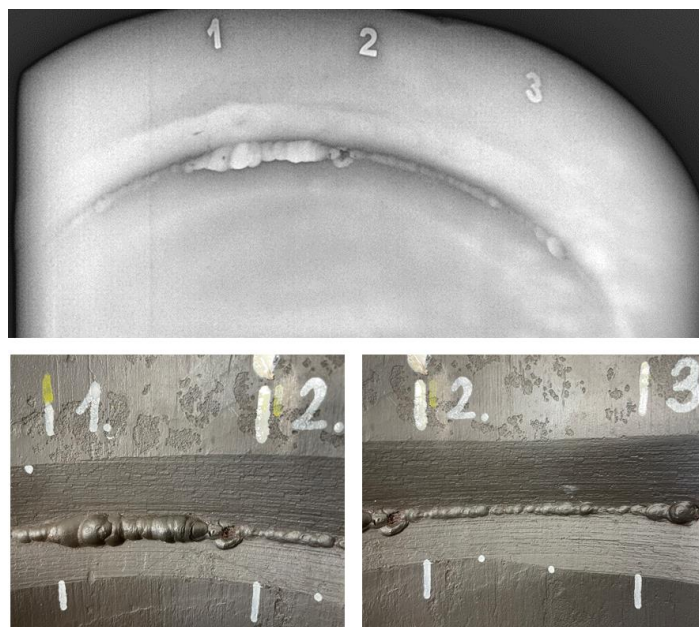


Obr. 4: Výsledky měření technikou PAUT

Rentgenografické zkoušení a vizuální kontrola

Zkouška RT byla provedena v RTG kabině osazené lampou GE Eresco MF4 s detektorem DX400 a zkouška byla realizována s parametry 190kV a 4,5 mA a získané snímky jsou zpracovány v SW Rhythm. Snímkování proběhlo z vnějšího povrchu pod úhlem a svar byl rozdělený na oblasti označené čísly včetně vyříznutého segmentu.

Na snímcích jsou patrné vady typu nadměrný průvar (převýšený kořen), hubený kořen, vrub v kořeni, případně struskový vměstek ve shluku.



Obr. 5: Srovnání RT a VT na části vzorku

Shrnutí

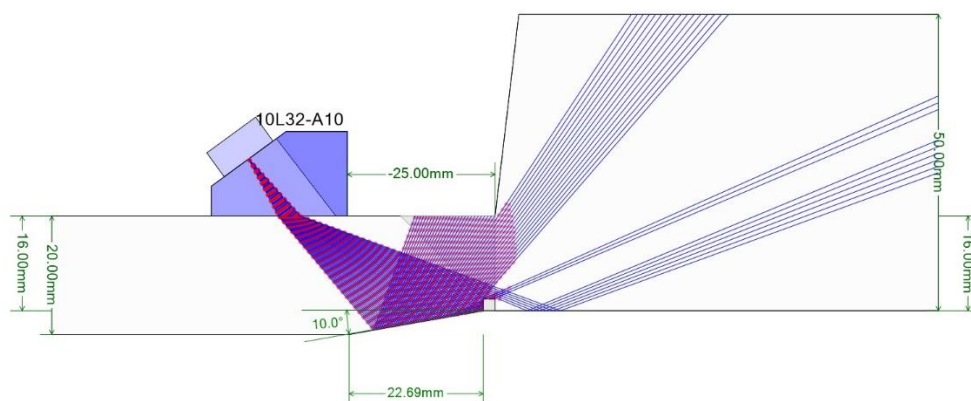
Při ultrazvukovém zkoušení technikou PEUT úhlovou sondou 60° je při provozním zkoušení a neznalosti vnitřního povrchu potrubí, rozměru úkosu a změny geometrie vůči výkresové dokumentaci, složité identifikovat jednotlivé typy vad, aby byla možná jejich detekce. V případě

techniky PAUT je situace lepší, protože zobrazení svaru v S-skenu přináší informaci, že geometrie ve skutečnosti neodpovídá výkresu a lze lépe izolovat jednotlivé vadové indikace a blíže se jim při vyhodnocování věnovat.

Aplikované metody NDT a jejich vzájemná kombinace přináší více informací o stavu svarového spoje než jen provedení provozní kontroly ultrazvukem technikou PEUT, která by byla spíše vhodná (pokud je nezbytně nutné ji použít) pro výrobní svary s geometrií dle výkresu a jistě i s lepším provedením svarového spoje, než je tomu u svarů montážních.

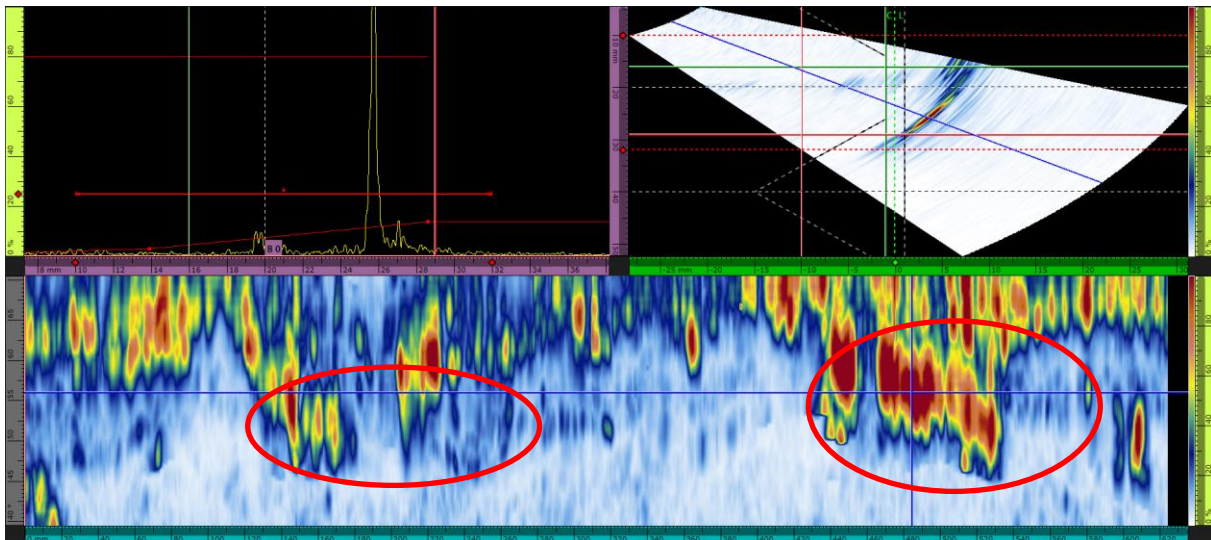
Svarový spoj bubnu kotle a spádových trubek

Dalším zajímavým příkladem je svarový spoj typu T navíc s technologickým neprůvarem na vnitřním povrchu. Tato kombinace velmi komplikuje identifikaci vad komunikujících s vnitřním povrchem zejména v oblasti neprůvaru. Jak tento svarový spoj vypadá a pokrytí jeho objemu během zkoušení phased array technikou je uvedeno na obr. 6.



Obr. 6: Řez svarovým spojem a jeho pokrytí phased array sondou

V provozu bylo realizováno zkoušení na 8 kusech těchto svarových spojů technikou phased array. Na všech svarových spojkách bylo detekováno množství drobných indikací ve svarovém spoji, které jsou s největší pravděpodobností výrobního původu. Vzhledem k velmi silné odezvě od technologického neprůvaru na vnitřním povrchu je velmi obtížná identifikace možných vad v jeho okolí. Největší indikace byly detekovány u všech svarových spojů v okolí 90° a 270° obvodové pozice. Vzhledem k tomu, že se tyto indikace nacházejí na všech svarových spojkách, jedná se pravděpodobně o indikace pocházející z výroby. Příklad záznamu z jednoho svarového spoje uveden na obr. 7.



Obr. 7: Záznam z měření svarového spoje a indikace na 90° a 270° označeny červeně

Závěr

V tomto článku byly uvedeny příklady svarových spojů, kde realizace ultrazvukového zkoušení vyžaduje důkladnou přípravu. Z výsledků je zřejmé, že pokud NDT pracovník nemá dostačující vstupní informace může provést nesprávnou interpretaci naměřených dat, což může vést k chybně určené klasifikaci svaru a tím finančním ztrátám ať už při realizaci opravy, které není nutná nebo naopak při poruše za provozu. Z těchto důvodů byla vydána doporučení, která by měla snížit tato rizika na minimum.

Poděkování

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

Literatura

- [1] VESELÁ, Jana, MAREŠ, Pavel, MATĚJÍČEK, Jan a BENEŠ, Petr. *Optimalizace postupu ultrazvukového zkoušení svarových spojů*. Centrum výzkumu Řež s.r.o., 2024, technická zpráva, PL5401.
- [2] MAREŠ, Pavel a VESELÁ, Jana. Creepové poškození ve svarových spojích a jeho detekce ultrazvukem. In: *Konference Potrubí 2024*, 2024, s. 19-22.
- [3] VESELÁ, J. - MAREŠ, P. Nedeštruktivní ověření výrobních vad svarových spojů zkušebních těles. *TechMagazín*, 2022, roč. 13, č. 8, s. 30-31.

VLIV VRUBU NA CREEPOVOU ODOLNOST NIZKOLEGOVANÉ CR-MO-V OCELI (ČSN 15 128)

NOTCH EFFECT ON THE CREEP RESISTANCE OF LOW ALLOY CR-MO-V STEEL (ČSN 15 128)

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

^{a)} Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., Žitkova 22, 616 00 Brno

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

Abstrakt

Pro zvýšení spolehlivosti a přesnější predikci životnosti vysokoteplotních komponent je nezbytné porozumět chování a vlivu defektů, které se v creepově odolných materiálech vyskytují v důsledku přítomnosti lokálních koncentrátorů napětí-vrubů. Koncentrace víceosého napětí, vzniklá přítomností vrubu, ovlivňuje creepové vlastnosti konstrukčního materiálu. Tato studie je zaměřena na výzkum vlivu V-vrubu na creepovou odolnost degradované parovodní trubky z nízkoalegované 0.5%Cr-0.5%Mo-0.3%V oceli (ČSN 15 128) po dlouhodobém provozním namáhání. Pro porovnání creepových vlastností byly provedeny doplňující creepové zkoušky i na vzorcích výchozího stavu parovodní trubky. Creepové zkoušky byly realizovány na hladkých vzorcích i vzorcích s V-vrubem při teplotě 550 °C v širokém intervalu aplikovaných tahových napětí. Za zvolených experimentálních podmínek byl prokázán zpevňující vliv vrubu, který lze přisuzovat lokálnímu víceosému namáhání, které vedlo k lokálnímu rozložení napětí během creepové expozice.

Abstract

In order to improve the reliability of high-temperature components and to predict their service life more accurately, it is necessary to understand the behaviour and the effect of defects that occur naturally in structural creep-resistant materials due to the local stress concentration produced by the notches. The local multiaxial stress concentration can influence the creep properties of structural materials. In the present study, the V-notch effect on the creep resistance of the pipe low-alloy 0.5%Cr-0.5%Mo-0.3%V (ČSN 15 128) steel after long-term service loading of high-pressure steam pipeline. For mutual comparison, supplementary creep tests were carried out on specimens which were cut from the as-received state of the pipeline. Creep tests were performed on both smooth and V-notched creep specimens at 550°C in the broad interval of the applied tensile stress. The effect of circumferential notches on the creep resistance is beneficial for the same net-section stress – the notches specimens exhibit a longer lifetime than the smooth specimens. This notch-strengthening is due to the constraint effect of the notch.

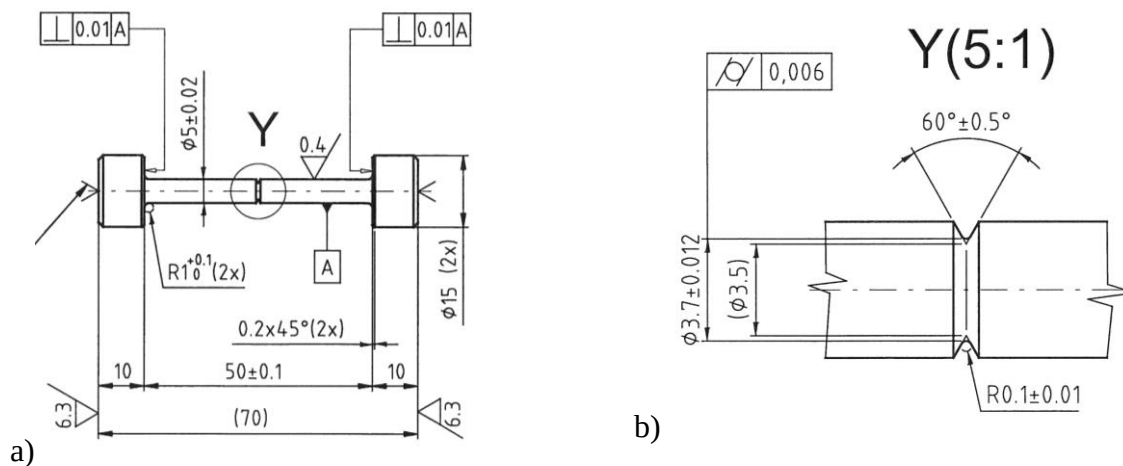
Úvod

Creepově odolné nízkoalegované oceli na bázi CrMoV jsou široce používány v parovodních systémech klasických i jaderných energetických zařízení [1-3]. Nízkoalegovaná ocel typu 0.5%Cr0.5%Mo0.3%V (ČSN 15 128) byla v Československu rozsáhle aplikována v tepelné energetice. V současnosti v České republice pracuje řada parovodních zařízení již přes návrhovou životnost. Během komplexního provozního namáhání vysokoteplotních komponent dochází k degradaci výchozích vlastností nízkoalegovaných ocelí působením řady procesů poškozování, jako jsou strukturní nestabilita slitin, oxidace a koroze a časově závislé deformáční procesy např. cyklická mechanická únava, plastická deformace tečením (creepem), či interakce creepu s únavou. Z uvedených degradačních procesů jsou mechanismy creepové deformace a porušování často považovány za kritické faktory, ovlivňující životnost parovodních systémů [4].

Creep CrMoV oceli byl intenzivně studován v řadě prací (pro přehled viz [5]). Je však třeba zdůraznit, že vysokoteplotní komponenty jsou v provozu podrobeny komplexnímu napětí-ovému namáhání, které se mění od jednoosého creepového zatěžování až po víceosý napětí-ový systém. Přitom rozhodující creepová data byla většinou získána právě pomocí jednoosých creepových zkoušek v tahu na hladkých vzorcích. Proto je nutné hledat takové experimentální a teoretické postupy, které jsou více relevantní provoznímu namáhání, ale přitom jsou ekonomicky přijatelné. V tomto příspěvku se zaměříme na možnost použít creepové vzorky opatřené ostrým V-vrubem, jehož přítomnost vede k lokální koncentraci napětí a mění napětí-ový stav z jednoosého na víceosý [6].

Experimentální část

Experimenty byly provedeny na nízkoaliovanou ocel CrMoV o následujícím chemickém složení (hm.%): 0,16 C, 0,56 Mn, 0,21 Si, 0,59 Cr, 0,43 Mo, 0,32 V, 0,013 Al, 0,001 P, 0,013 S, 0,0142 N, získané ve formě segmentů parovodní trubky. Pro vzájemné porovnání vlivu strukturní degradace oceli byly získány dva rozdílné stavy trubky: a) trubka ve výchozím neprovozaném stavu (v dalším stav označován jako **VS**) a ve stavu po dlouhodobé provozní expozici (akumulovaná doba provozu 213 543 h při průměrné teplotě 528 °C a průměrném vnitřním tlaku 9,6 MPa; počet najetí 738), který bude označován jako degradovaný stav **DS**. Ze segmentů trubek byly vyrobeny válcové creepové vzorky o měrné délce 50 mm a vnějším průměru $D = 5$ mm – obr. 1(a). Pro zkoumání vlivu vrubu na creepovou odolnost byly některé vzorky ponechány bez vrubu (hladké vzorky pro výchozí a degradovaný stav jsou označeny **VSH** či **DSH**), zatímco vrubované vzorky (**VSV** a **DSV**) byly opatřeny ostrým obvodovým V-vrubem (detail viz obr. 1(b), provedeným ve středu měrné délky vzorku [7] a kterému odpovídá redukovaný průřez vzorku o průměru $d = 3,5$ mm. Komparační creepové zkoušky realizované v ÚFM AV ČR, v. v. i. [5] byly provedeny v tahu při konstantním zatížení v atmosféře čistého a sušeného argonu.



Obr. 1: Výkres creepového válcového vzorku: (a) tvar a rozměry vzorku, (b) detail V-vrubu

Creepová zkušební teplota 550 °C se pohybovala v rozmezí ± 0.5 °C podél celé měrné délky vzorku. Creepové prodloužení ϵ bylo snímáno indukčním snímačem Hottinger-Baldwin Co. (W10K) s citlivostí 5×10^{-6} a průběžně digitálně registrováno v průběhu celé creepové zkoušky a následně počítačově vyhodnoceno. Z technických důvodů bylo možno vést creepové zkoušky v režimu konstantního aplikovaného zatížení. Vedle creepových zkoušek probíhal mikrostrukturní rozbor exponovaných creepových vzorků pomocí světelné a elektronové SEM mikroskopie.

Výsledky

Creepové zkoušky

V rámci výsledků naší předchozí studie termálního creepu nízkolegované oceli 0.5%Cr0.5%Mo0.3%V [5] byly identifikovány jednotlivé oblasti creepu i působící relevantní mechanismy creepové deformace. Na základě těchto výsledků byla zvolena zkušební teplota 550 °C a vybrán interval aplikovaného (počátečního) napětí σ v rozsahu 175 až 320 MPa, který odpovídá oblasti mocninového (dislokačního) creepu, a který je realizován skluzem a šplhem mobilních dislokací [5,8].

Obecně je rychlost creepové deformace $\dot{\epsilon}$ v závislosti na aplikovaném napětí σ a teplotě T v oblasti mocninového creepu popisována empirickým Nortonovým vztahem [5]

$$\dot{\epsilon} = A (\sigma)^n \exp (- Q_C / RT), \quad (1)$$

kde napěťový exponent rychlosti creepu n

$$n = (\partial \ln \dot{\epsilon}_m / \partial \ln \sigma)_T. \quad (2)$$

V uvedených vztazích je A materiálová konstanta, Q_C aktivační energie creepu a R plynová konstanta.

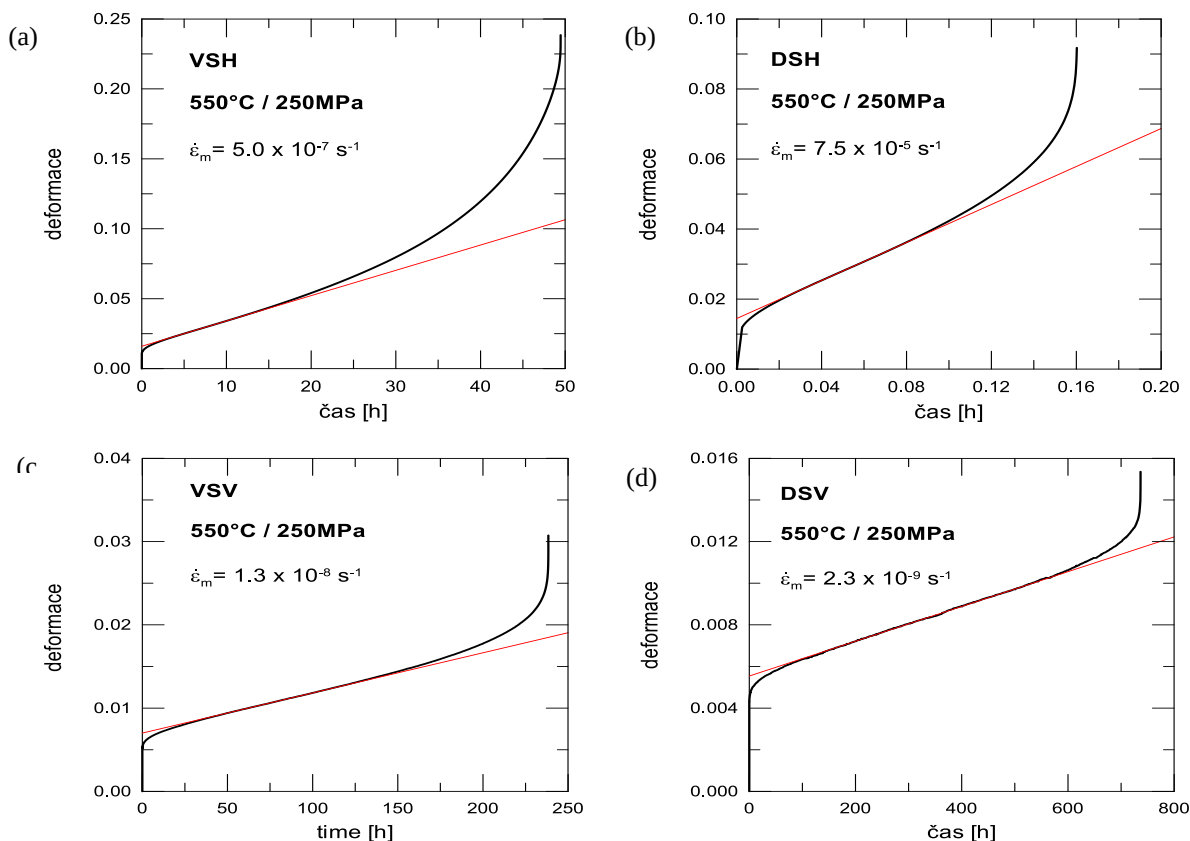
Základní informace o degradaci creepových vlastností i samotném vlivu vrubu na creepové chování studované slitiny lze získat rozбором časových závislostí creepové deformace (creepových křivek). Pro ilustraci byly zvoleny creepové křivky hladkých i vrubovaných vzorků výchozího a degradovaného stavu, exponovaných při aplikovaném napětí 250 MPa – obr. 2. Přes rozdílné doby creepových expozic (creepové zkoušky byly vedeny do lomu vzorku) a dosažené hodnoty minimální (stacionární) rychlosti creepu se creepové křivky hladkých vzorků výchozího (VSH) a degradovaného stavu (DSH) tvarově významně neliší (obr. 2(a),(b)). Červená přímka vyznačuje nejen způsob určení minimální rychlosti creepu, ale i podíl jednotlivých stadií creepu. Z porovnání obr. 2(a) a 2(b) je patrné, že převládající doba creepové expozice hladkého vzorku VSH odpovídá urychlenému (terciárnímu) stadiu; u vzorku DSH je toto stadium již poloviční. Markantní je snížení hodnoty lomové plasticity ϵ_f , dramatické zkrácení doby do lomu t_f (creepové životnosti) a zvýšení hodnoty minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ hladkého vzorku degradovaného stavu (obr. 2(b)) zřejmě v důsledku degradačních mikrostrukturních procesů při provozním namáhání [4,5,9].

Ilustraci vlivu vrubu na creepové chování vzorků ve výchozím a degradovaném stavu umožňuje vzájemné porovnání creepových křivek obr. 2(c) a 2(d), které ukazuje, že stadium terciárního (urychleného) creepu u vzorku degradovaného stavu je podstatně kratší než u vzorku výchozího stavu. Dále dochází k mírnému snížení minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ a výraznému prodloužení doby do lomu t_f u vzorku degradovaného stavu.

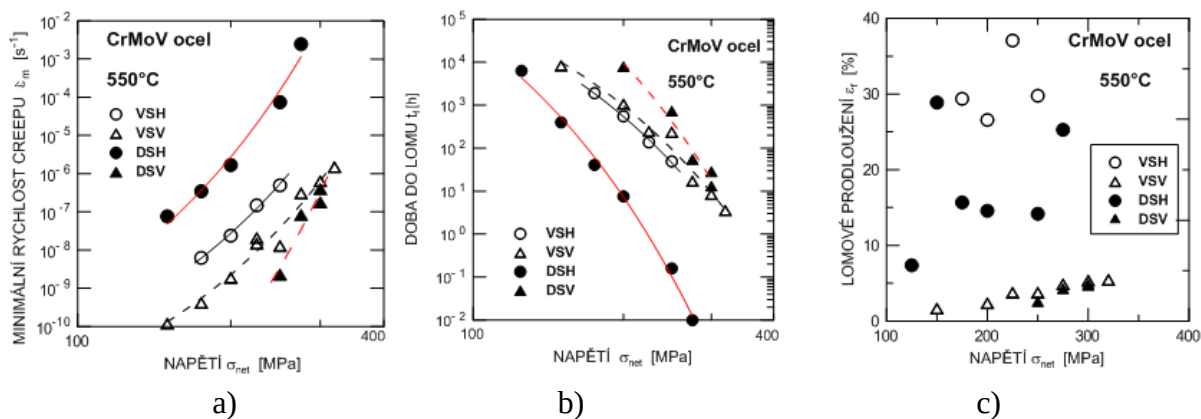
Případné porovnání creepových výsledků na hladkých vzorcích a vzorcích s vrubem (obr. 3) vyžaduje bližší vysvětlení způsobu zatěžování vzorků. Vztah mezi hlavním osovým napětím σ (homogenní tahové napětí v průřezu hladkého vzorku) a napětím σ_{net} (lokální napětí v nejužším (redukovaném) nosném průřezu vrubovaného vzorku) lze popsat následovně:

$$\sigma_{net} = \sigma (D^2 / d^2). \quad (3)$$

S použitím údajů v obr. 1 podle teorie elastomechaniky přítomnost navrženého vrubu vyvolá zhruba 2,2násobné zvýšení hlavního osového napětí; ve skutečnosti je vlivem odlišných deformáčnických vlastností zejména povrchové vrstvy skutečný součinitel koncentrace napětí α na počátku zkoušky o něco nižší. Pro porovnání creepových parametrů hladkých a vrubovaných vzorků v závislosti na napětí byla zvolena vždy stejná hodnota σ_{net} .



Obr. 2: Časové závislosti creepové deformace (creepové křivky) hladkých i vrubovaných vzorků obou strukturních stavů pro počáteční napětí 250 MPa v nosném průřezu vzorku: (a) hladký vzorek VSH, (b) hladký vzorek DSH, (c) vrubovaný vzorek VSV a (d) vrubovaný vzorek DSV. V obrázcích jsou uvedeny i stanovené hodnoty minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$

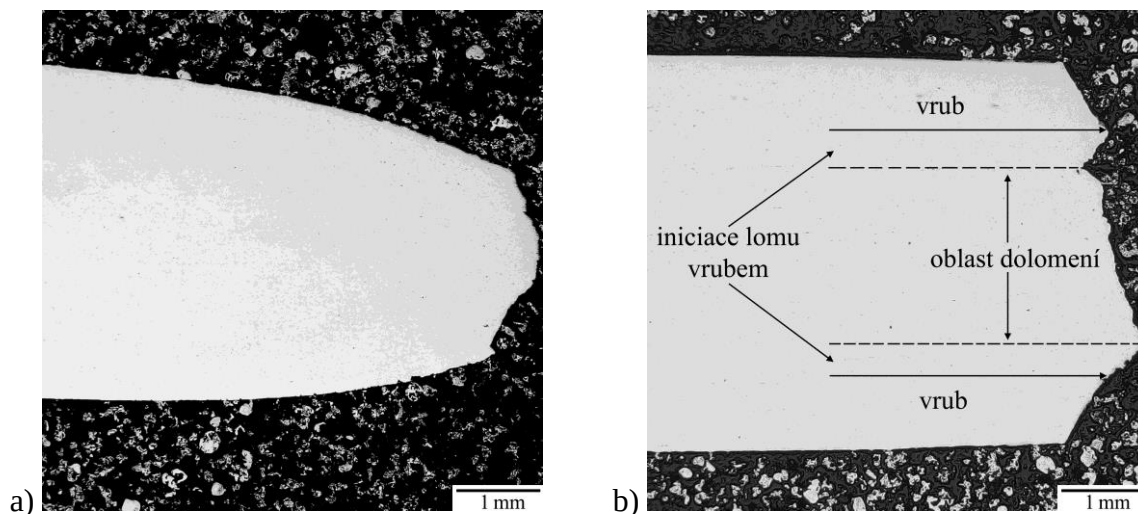


Obr. 3: Napětíové závislosti (a) minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$, (b) doby do lomu t_f a (c) lomového prodloužení ϵ_f hladkých vzorků (VSH a DSH) a vzorků s vruby (VSV a DSV) pro výchozí a degradovaný stav

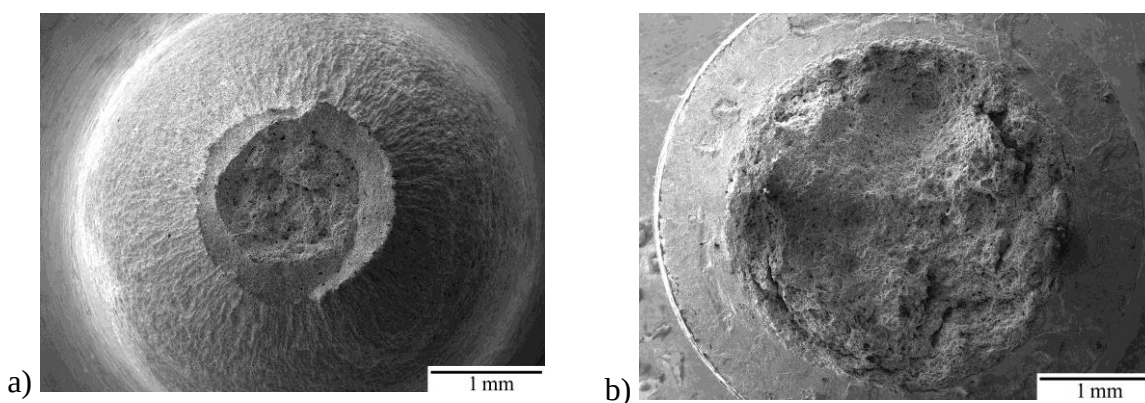
Z obr. 3(a) je patrné, že v případě obou strukturních stavů dochází vlivem přítomnosti vrubu ke snížení minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$, což lze vysvětlit tzv. vrubovým zpevněním oceli. Tento efekt je více markantní pro degradovaný stav. Na základě prokázané platnosti Monkmanova a Grantova vztahu ($\dot{\epsilon}_m \sim C_{MG} / t_f$, C_{MG} je materiálová konstanta) pro creep této oceli [5] dochází logicky v důsledku snížení creepové rychlosti k prodloužení doby do lomu (creepové životnosti) vrubovaných vzorků, opět především u degradovaného stavu. – obr. 3(b). Nejmarkantnějším rozdílem v chování je drastické snížení hodnoty lomového prodloužení (creepové plasticity) u vzorků s vruby (obr. 3(c)), ke kterému dochází u obou strukturních stavů.

Fraktografie

Je zřejmé, že výrazně rozdílné hodnoty creepové plasticity souvisejí se způsobem creepového porušení a průběhem lomových procesů. Proto bylo rozhodnuto provést rozbor lomového profilu na podélných metalografických výbrusech lomových vzorků (obr. 4) a analýzu samotného lomu pomocí SEM (obr. 5). Lomový profil hladkého vzorku výchozího stavu (obr. 4(a)) vykazuje významnou kontrakci charakteristickou pro tvárný transkrystalický lom (obr. 5), zatímco u lomu vzorku s vrubem (obr. 4(b)) není kontrakce výrazná a lom probíhá v rozdílných etapách lomového procesu (iniciace a tvárné dolomení nosného průřezu, obr. 5(b)).



Obr. 4: Profil lomů při napětí $\sigma_{net} = 200$ MPa u (a) hladkého vzorku a (b) vzorku s vrubem. Výchozí stav, osa tahového napětí je horizontální.



Obr. 5: SEM lomové plochy při napětí $\sigma_{net} = 200$ MPa u (a) hladkého vzorku a (b) vzorku s vrubem. Degradovaný stav.

Z provedeného fraktografického rozboru vyplývá, že zatímco lom u hladkých vzorků je důsledkem ztráty plastické stability matrice, je lom vzorků s vruby iniciován lokální deformací v blízkosti kořene vrubu a v dalším průběhu plastickým přetvořením nosného průřezu vzorku.

Závěr

Z publikovaných prací o vlivu vrubu na creepové chování vyplývá, že účinek vrubu je závislý na době statického zatížení, na zkušební teplotě, na počáteční koncentraci napětí α a na složení a struktuře materiálu [6,7]. Vrubový účinek je tím větší, čím vyšší je teplota, čím delší zatížení působí a čím horší jsou počáteční plastické vlastnosti ocele při namáhání. Předložené výsledky této práce mají vztah spíše ke krátkodobým creepovým zkouškám a plastické

vlastnosti jsou v úzkém vztahu k dosaženému strukturnímu stavu oceli. Je třeba zdůraznit, že změny ve tvaru kořene vrubu při krátkodobé zkoušce umožňují větší lokální plastické deformace. Důležitý je i samotný působící mechanismus creepové deformace. Zatímco u krátkodobých zkoušek lze očekávat deformaci zrn v důsledku skluzu a šplhu dislokací, při dlouhodobých zkouškách se creepová deformace uskutečňuje prostřednictvím procesů spojených s hranicemi zrn.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TN02000018 NCK Strojírenství. Autoři děkují svému kolegovi Ing. Miroslavu Vitulovi za technickou pomoc při realizaci creepových experimentů.

Literatura

- [1] MAYER, K.-H. The development of creep-resistant steel. In: F. Abe, T.-U. Kern, R. Viswanathan (Eds.). *Creep-resistant Steels*. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2008. p. 15-77 (Chapter 2). ISBN 978-1-84569-178-3.
- [2] ROBERTSON, D.G. Traditional low alloy steels in in power plant design. In: A. Shibli (Ed.). *Coal Power Plant Materials and Life Assessment: Development and Applications*. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2014, p. 107-126 (Chapter 4).
- [3] WILLIAMS, T. - NANSTAD, R. Low-alloy steels. In: G.R. Odette, S.J. Zinke (Eds.). *Structural Alloys for Nuclear Energy Applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019, p. 411-486 (Chapter 10). ISBN 978-0-12-397046-6.
- [4] SKLENIČKA, V., KUCHAROVÁ, K., FOLDYNA, V., ČADEK, J. Interrelationship between creep deformation and creep rupture in a low alloy CrMoV steel after service. In: B. Wilshire, R.W. Evans (Eds.), *The 3rd Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures*. London: The Institute of Metals, 1987, p. 361-377.
- [5] KVAPILOVÁ, M. - OHANKOVÁ, M. - KRÁL, P. - DVOŘÁK, J. - KUCHAROVÁ, K. - ČMAKAL, J. - SKLENIČKA, V. Characterization of creep properties and the microstructure of a service-exposed low alloy CrMoV steel steam pipe. *Materials Science and Engineering A*, 2022, vol. 853, paper 143684, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143684>
- [6] ALANG, N.A. - NIKBIN, K. An analytical and numerical approach to multiscale ductility constraint based model to predict uniaxial/multiaxial creep rupture and cracking rates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 135, p. 343-352, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.030>
- [7] DAI, Y. - LIU, Y. - QIN, F. - CHAO, Y.J. - BERTO, F. Estimation of stress field for sharp V-notch in power-law creeping solids: An asymptotic view. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 180-181, p. 189-204, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.07.028>
- [8] SANDSTRÖM, R. *Basic Modeling and Theory of Creep of Metallic Materials*. Springer Series in Materials Science 339. Cham, Switzerland: Springer, 2024. ISBN 978-3-031-49506-9.
- [9] PURMENSKÝ, J. - FOLDYNA, V. - KUBOŇ, Z. Creep resistance and structural stability of low-alloy CrMo and CrMoV steels. *Key Engineering Materials*, 2000, vol. 171-174, p. 419-426.

CREEPOVÉ CHOVÁNÍ SUPERSLITINY IN939 VYROBENÉ METODOU L-PBF

CREEP BEHAVIOUR OF SUPERALLOY IN939 PRODUCED BY L-PBF METHOD

Marie Kvapilová, Ivo Šulák, Ivo Kuběna, Jiří Dvořák, Petr Král a Václav Sklenička

Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., Žižkova 22, 616 00 Brno

Abstrakt

Technologie laserové fúze v práškovém loži (L-PBF) se stala novou hybnou silou s vysokým potenciálem pro výrobu energetických komponent se složitou geometrií, které by bylo obtížné ne-li nemožné vyrobit jinými konvenčními technologiemi. Příspěvek je zaměřen na popis vysokoteplotního creepového chování niklové superslitiny IN939 vyrobené metodou L-PBF.

Abstract

Laser powder bed fusion (L-PBF) technology has become a new driving force with high potential for manufacturing power components with complex geometries that would be difficult if not impossible to manufacture with other conventional technologies. The article is focused on the creep behaviour at elevated temperatures of the nickel superalloy IN939 produced by the L-PBF method.

Úvod

Inconel 939 je vysokoteplotní niklová superslitina, která vykazuje excelentní kombinaci únavových a creepových vlastností s vysokou odolností proti oxidaci a korozi. Proto je často používána pro vysokoteplotní aplikace hlavně v lité formě např. pro výrobu lopatek turbín, a její provozní teplota je obvykle do 850°C. Mikrostruktura lité slitiny je tvořena dendritickou maticí tuhého roztoku γ zpevněnou precipitáty γ' primárně sférického tvaru, jejichž podíl je po tepelném zpracování zhruba 30-40 %. Dalšími složkami, které slitina obsahuje, jsou eutektická fáze $\gamma-\gamma'$, hrubší karbidy typu MC (M je tvořen hlavně Ti, Ta nebo Nb) a jemnější karbidy typu $M_{23}C_6$ (kde M je hlavně zastoupeno chromem). Důležitým faktorem, který může ovlivnit chování lité slitiny INC939 během provozu komponent jsou změny mikrostruktury (velikosti a morfologie částic γ' , degradace karbidů na hranicích zrn), které mohou vést k snížení plasticity a pevnostních creepových charakteristik slitiny [1]. Výhodou slitiny INC939 oproti často používané slitině INC738 je její výrazně lepší korozní odolnost [2].

I přes nesporné výhody slitiny INC939 pro výrobu vysokoteplotních komponent je proces lití a hlavně následného tepelného zpracování při jejich výrobě časově náročný a jeho výsledkem je často chemická i strukturní heterogenita. Navíc při této klasické výrobě dochází při následném časově náročném obrábění a opracování povrchu k velkým materiálovým ztrátám.

V současné době jsou při výrobě vysokoteplotních komponent na vzestupu metody aditivních technologií běžně označovány jako 3D tisk. I když tato metoda pro IN939 donedávna balancovala na hraně použitelnosti, ukázalo se, že optimalizací parametrů tisku je možné vytvořit materiál bez defektů [3,4]. Konkrétně technologie laserové fúze v práškovém loži (L-PBF) se stala novou hybnou silou s vysokým potenciálem pro výrobu energetických komponent se složitou geometrií a komplikovanou vnitřní strukturou, které by bylo obtížné ne-li nemožné vyrobit jinými konvenčními technologiemi [5,6]. Je však třeba uvést, že mikrostruktura vytištěné superslitiny L-PBF IN939 je díky vysokoteplotním gradientům a rychlosti tuhnutí při procesu L-PBF zcela odlišná od konvenčního litého stavu [1]. Zvláštním rysem L-PBF materiálu je přítomnost vysoké hustoty dislokací ($\approx 10^{15} \text{ m}^{-2}$), typická pro silně deformované kovy, která může mít podstatný vliv na mechanické vlastnosti. Rychlé ochlazení spojené s procesem L-PBF také způsobí, že ve struktuře není čas na vysrážení zpevňujících fází. Bylo však ukázáno,

že ve skutečnosti je získaná mikrostruktura nerovnovážná a dlouhodobé vystavení zvýšeným teplotám může vést k nekontrolované precipitaci γ' fáze, což dramaticky snižuje plasticitu [7]. Proto je nezbytné provést následné tepelné zpracování a precipitační vytvrzení [8,9].

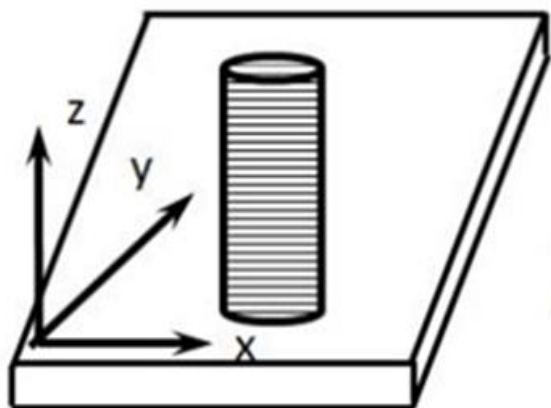
Pro využití vysokoteplotní niklové superslitiny připravené metodou L-PBF je nutná znalost jejího chování při mechanickém zatěžování. Pevnostní charakteristiky a únavové vlastnosti lité slitiny se jeví jako horší než u L-PBF slitiny INC939, což je zapříčiněno jednak přítomností licích vad a větším množstvím karbidů u litého stavu, které vedou stavu k předčasnému lomu, ale také odlišnou velikostí zrna [8,9]. Studium creepového chování tištěné slitiny bylo studováno jen v jedné práci a to hlavně s ohledem na druh tepelného zpracování a s tím spojenou rekrytalizací zrn [7]. Tato práce se věnuje creepovému chování niklové superslitiny INC939 za různých podmínek zatěžování (teplota, aplikované napětí) připravené metodou L-PBF.

Experimentální část

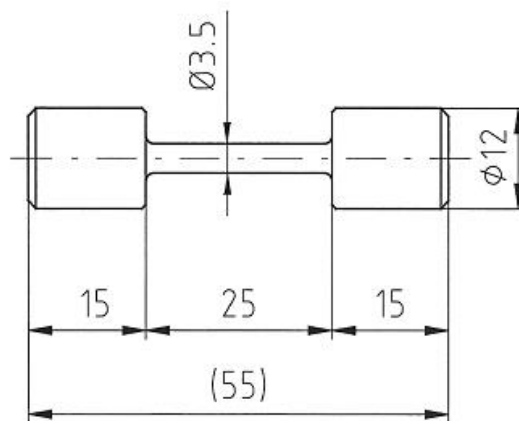
Složení komerčního prášku EOS, ze kterého byla slitina tisknuta i složení vzorků samotné slitiny je uvedeno v tab. 1. Slitina byla tištěna ve vertikálním směru, jak je schematicky znázorněno na obr. 1. Následovalo rozpouštěcí žíhání (1175 °C /45 minut) a pak 2stupňové precipitační vytvrzení na 1000 °C/6 h a 800 °C/4 h.

Tab. 1: Složení slitiny INC 939

	C	Cr	Co	W	Ta	Nb	Al	Ti	Ni
prášek	0.15	22.5	19.0	2.0	1.4	1.0	2.05	3.7	Bal.
3D tisk	0.15	22.5	18.95	2.0	1.37	1.0	2.04	3.68	Bal.
litý stav	0.12	22.3	19.1	1.99	1.44	1.03	2.05	3.65	Bal.



Obr. 1: Vertikální tisk vzorku (směr tisku – osa Z)



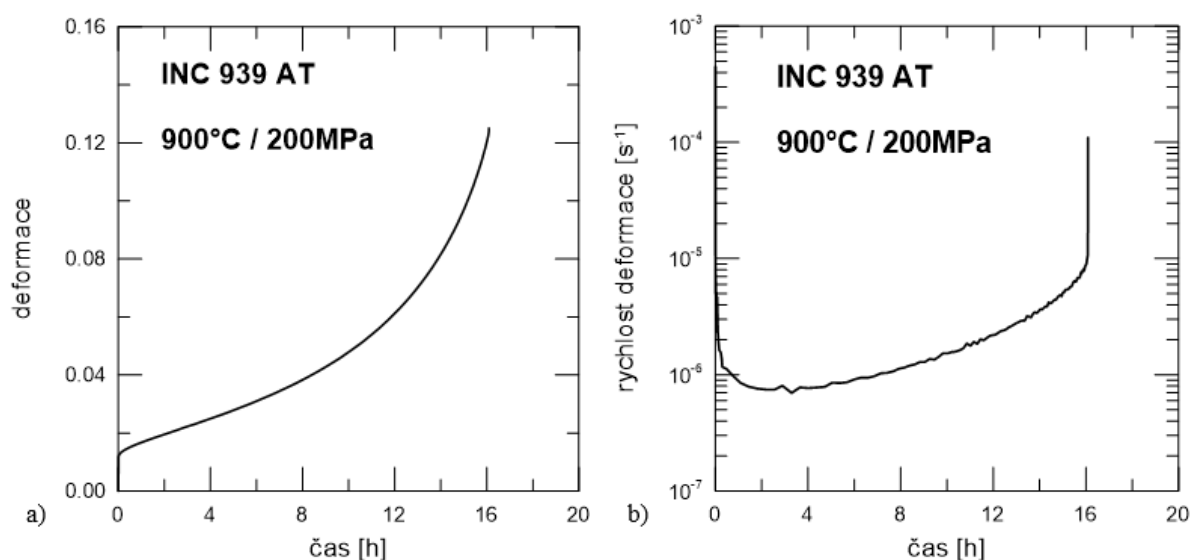
Obr. 2: Schéma creepového vzorku

Z takto vytištěných polotovarů byly vyrobeny creepové vzorky o měrné délce 25 mm a průměru díku 3,5 mm (obr. 2). Creepové zkoušky byly provedeny v jednoosém tahu při konstantním zatížení v atmosféře čistěného a sušeného argonu při teplotách 800 °C a 900 °C (teplota podél vzorku byla udržována v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$ od požadované zkušební teploty). Creepové stroje byly vybaveny indukčním snímačem Hottinger-Baldwin Co. pro kontinuální měření creepového prodloužení a data byla zaznamenávána digitálně (crepové prodloužení bylo měřeno s citlivostí 5×10^{-6}). Všechny creepové zkoušky byly vedeny až do konečného creepového lomu vzorků. Lomová prodloužení přetržených vzorků byla navíc kontrolována Gaussovým komparátorem [10].

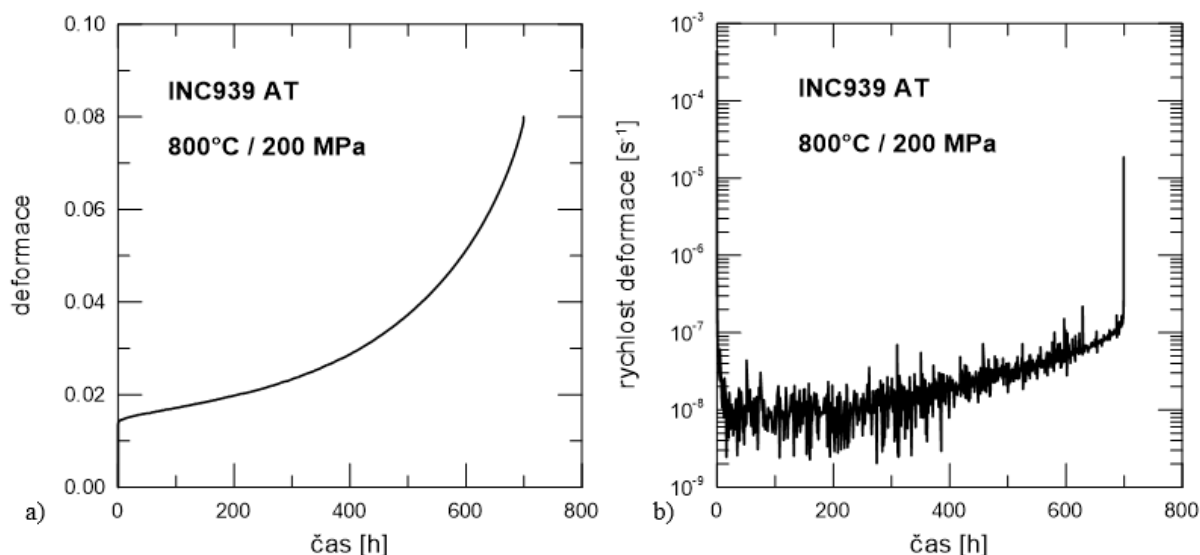
Výsledky

Creepové chování superslitiny

Standardní creepové chování slitiny lze zobrazit pomocí tzv. creepové křivky jako časovou závislost deformace při daných zatěžovacích podmínkách (obr. 3a). Pro snadnější určení jednotlivých stádií creepu je často používána modifikovaná creepová křivka časové závislosti rychlosti creepové deformace na čase (obr. 3b). Z této závislosti je patrné, že sekundární stádium creepu je redukováno pouze na inflexní bod křivky, ve kterém je dosaženo minimální rychlosti creepu. Příklady creepových křivek při teplotě 800 °C jsou na obr. 4.



Obr. 3: Časová závislost deformace (a) a rychlosti deformace (b) pro slitinu INC939 AT při teplotě 900 °C a aplikovaném napětí 200 MPa



Obr. 4: Časová závislost deformace (a) a rychlosti deformace (b) pro slitinu INC939 AT při teplotě 800 °C a aplikovaném napětí 200 MPa

Pro identifikaci creepových deformačních mechanismů, působících ve slitině během creepového zatěžování, lze použít napěťových závislostí minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_m$ a doby do lomu t_f při daných teplotách T . Tyto závislosti lze v oblasti mocninového (dislokačního) creepu popsat empirickým Nortonovým vztahem [11]

$$\dot{\epsilon}_m = A \sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta Q_C}{RT}\right) \quad (1)$$

kde A je materiálová konstanta, Q_C aktivační energie creepu a R plynová konstanta. Napětový exponent rychlosti creepu n je tedy dán vztahem

$$n = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}_m}{\partial \ln \sigma} \right)_T \quad (2)$$

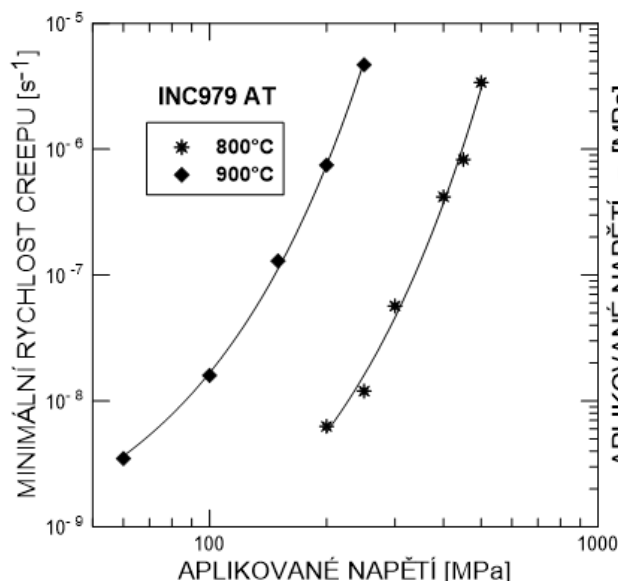
Doba do lomu vzorku při creepové expozici může být vyjádřen analogickým vztahem

$$t_f = B \cdot \sigma^{-m} \exp\left(\frac{Q_f}{RT}\right), \quad (3)$$

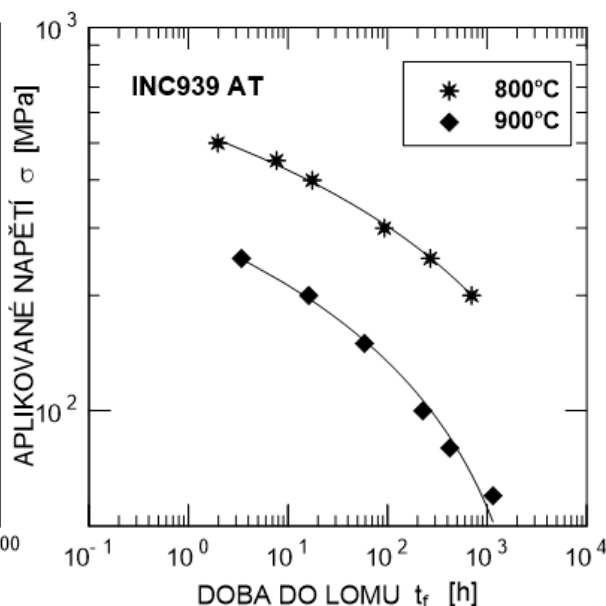
kde B je materiálová konstanta a Q_f aktivační energie lomu. Napětový exponent m doby do lomu může být tedy určen jako

$$m = - \left(\frac{\partial \ln t_f}{\partial \ln \sigma} \right)_T. \quad (4)$$

Napětové závislosti minimální rychlosti creepu a doby do lomu, ze kterých mohou být určeny exponenty n a m jsou uvedeny na obr. 5 a obr. 6. Lze vidět, že hodnoty napětových exponentů jsou napětově závislé, což může implikovat změnu působnosti creepového deformačního či lomového mechanismu, který průběh creepového chování řídí. Exponenty n a m byly určeny ze směrnice lineárního fitování křivek při každém napětí a teplotě. Napětový exponent n leží pro teplotu 800 °C v rozmezí hodnot 5-13, pro teplotu 900 °C v rozmezí 3-8, což v obou případech naznačuje, že creepové testy byly prováděny v oblasti mocninného creepu. Rovněž hodnoty exponentů m leží v rozmezí 5-13 pro teplotu 800 °C a 3-7 pro teplotu 900 °C. Téměř totožné hodnoty napětových exponentů n a m naznačují, že řídicí mechanismus deformačního i lomového chování je stejný. Srovnáním zjištěných hodnot exponentů n a m s literaturou lze předpokládat, že v této studii je řídicím mechanismem provedených creepových testů difúzí řízený dislokační šplh. Nicméně při nižších hodnotách napětí, kdy napětové exponenty klesnou na nižší hodnoty, může dojít k deformačním procesům závislejícím na chování materiálu na hranicích zrn (skluz dislokací po hranicích zrn, kavitace na hranicích zrn nebo k difúznímu creepu) [12-16].



Obr. 5: Napěťové závislosti minimální rychlosti creepu pro teplotu 800 °C a 900 °C



Obr. 6: Napěťové závislosti doby do lomu pro teplotu 800 °C a 900 °C

Závěr

V článku bylo studováno creepové chování niklové superslitiny INC939 za různých podmínek zatěžování (teplota, aplikované napětí) připravené metodou L-PBF. Bylo zjištěno, že stacionární stádium creepových křivek bylo minimalizováno pouze na inflexní bod, ve kterém byla určena minimální rychlost creepu. Z napěťových závislostí minimální rychlosti creepu a doby do lomu byly určeny napěťové exponenty n a m . Jejich hodnoty, které se se stejnou tendencí měnily se změnou velikosti napětí, naznačují, že řídicí creepový deformační a lomový mechanismus je identický a jedná se pravděpodobně o difúzi řízený dislokační šplh.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Grantové agentury ČR v rámci řešení projektu 23-06167S.

Literatura

- [1] JAHANGIRI, M.R. - ARABI, H. - BOUTORABI, S.M.A. Comparison of microstructural stability of IN939 superalloy with two different manufacturing routes during long-time aging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, vol. 24, p. 1717-1729, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63245-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63245-3)
- [2] GIBBONS, T.B. - STICKLER, R. IN939: Metallurgy, Properties and Performance. In: R. Brunetaud, D. Coutsouradis, T.B. Gibbons, Y. Lindblom, D.B. Meadowcroft, R. Stickler (Eds.). *High Temperature Alloys for Gas Turbines 1982*, Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 1982, p. 369-393, https://doi.org/10.1007/978-94-009-7907-9_15
- [3] MIŠKOVIĆ, Z. - JOVANOVIĆ, M. - GLIGIĆ, M. - LUKIĆ, B. Microstructural investigation of IN 939 superalloy. *Vacuum*, 1992, vol. 43, p. 709-711, [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(92\)90115-D](https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90115-D)
- [4] MARCHESE, G. - PARIZIA, S. - SABOORI, A. - MANFREDI, D. - LOMBARDI, M. - FINO, P. - UGUES, D. - BIAMINO, S. The Influence of the Process Parameters on the Densification and Microstructure Development of Laser Powder Bed Fused Inconel 939. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 7, paper 882, <https://doi.org/10.3390/met10070882>

- [5] RAZA, S.A. - CANYURT, O.E. - SEZER, H.K. A systematic review of Inconel 939 alloy parts development via additive manufacturing process. *Heliyon*, 2024, vol. 10, paper e25506, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25506>
- [6] KULKARNI, A. *Additive Manufacturing of Nickel Based Superalloy*. arXiv: Applied Physics [online]. 2018 [cit. 2024-08-23]. Available on: https://www.academia.edu/68986390/Additive_Manufacturing_of_Nickel_Based_Superalloy
- [7] BANOTH, S. - LI, C.-W. - HIRATSUKA, Y. - KAKEHI, K. The Effect of Recrystallization on Creep Properties of Alloy IN939 Fabricated by Selective Laser Melting Process. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 8, paper 1016, <https://doi.org/10.3390/met10081016>
- [8] ŠULÁK, I. - BABINSKÝ, T. - CHLUPOVÁ, A. - MILOVANOVIC, A. - NÁHLÍK, L. Effect of building direction and heat treatment on mechanical properties of Inconel 939 prepared by additive manufacturing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, vol. 37, p. 1071-1076, <https://doi.org/10.1007/s12206-022-2101-7>
- [9] KUBĚNA, I. - BABINSKÝ, T. - NÁHLÍK, L. - ŠULÁK, I. Cyclic stress–strain behavior of additively manufactured gamma prime strengthened superalloy at elevated temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, vol. 133, paper 104623, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104623>
- [10] KVAPILOVA, M. - KRAL, P. - DVORAK, J. - SKLENICKA, V. High Temperature Creep Behaviour of Cast Nickel-Based Superalloys INC 713 LC, B1914 and MAR-M247. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 1, paper 152, <https://doi.org/10.3390/met11010152>
- [11] KVAPILOVA, M. - DVORAK, J. - KRAL, P. - HRBACEK, K. - SKLENICKA, V. Creep behaviour and life assessment of a cast nickel – base superalloy MAR – M247. *High Temperature Materials and Processes*, 2029, vol. 38, p. 590-600, <https://doi.org/10.1515/htmp-2019-0006>
- [12] ČADEK, J. *Creep in Metallic Materials*. Elsevier, 1988.
- [13] KASSNER, M.E. *Fundamentals of creep in metals and alloys*. 2nd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2009.
- [14] Weertman, J. Theory of Steady-State Creep Based on Dislocation Climb, *Journal of Applied Physics* 26 (1955) 1213-1217. <https://doi.org/10.1063/1.1721875>
- [15] BARRETT, C.R. – NIX, W.D. A model for steady state creep based on the motion of jogged screw dislocations. *Acta Metallurgica*, 1965, vol. 13, p. 1247-1258, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(65\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0001-6160(65)90034-9)
- [16] KASSNER, M.E. Taylor hardening in five-power-law creep of metals and Class M alloys. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, no. 1, p. 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.019>

HODNOCENÍ DEGRADACE OCELÍ 304H A HR3C POMOCÍ MALÝCH VZORKŮ

DEGRADATION EVALUATION OF 304H AND HR3C STEELS USING SMALL SAMPLES

Eva Chvostová ^{a)}, Pavel Konopík ^{a)}, Lucie Pilsová ^{b)} a Tomáš Chmela ^{b)}

^{a)} COMTES FHT a.s., Dobřany

^{b)} UJP PRAHA a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha 5 – Zbraslav

Abstrakt

Cílem této studie bylo najít optimálně citlivou mechanickou zkoušku pro detekci degradace konkrétních materiálů SUPER 304H a HR3C, které se používají na teplosměnné plochy progresivních nebo nadkritických elektráren, konkrétně pro přehříváky. Pro tento účel byl jako experimentální materiál zajištěn polotovár ve formě trubky rozměrech 38×6,3. Pro degradační stav austenitických materiálů bylo použito několik mechanických zkoušek, avšak kvůli omezenému množství materiálu byla upřednostněna technika mini vzorků. Výzkum ukázal, že zkouška lomové houževnatosti byla schopna identifikovat degradaci již po krátké době u materiálu HR3C. Ostatní zkoušky rovněž prokázaly schopnost detekce degradace, i když s nižší citlivostí. Tato studie navrhuje, že pro zachycení prvních náznaků degradace je nejvhodnější použít zkoušku lomové houževnatosti. Výsledky tohoto výzkumu mohou být využity pro lepší pochopení mechanismů degradace materiálů a pro zlepšení jejich odolnosti v průmyslových aplikacích.

Abstract

The aim of this study was to find an optimally sensitive mechanical test for the detection of degradation of specific SUPER 304H and HR3C materials used for the heat transfer surfaces of progressive or supercritical power plants, specifically for superheaters. For this purpose, a semi-finished product in the form of a tube with specific dimensions 38×6.3 was provided as experimental material. Several mechanical tests were used for the degradation state of the austenitic materials, but due to the limited amount of material, the sub sample technique was preferred. The research showed that the fracture toughness test was able to identify the degradation after a short time for the HR3C material. Other tests also demonstrated the ability to detect degradation, albeit with lower sensitivity. This study suggests that the fracture toughness test is the most appropriate test to detect the first signs of degradation. The results of this research can be used to better understand the degradation mechanisms of materials and to improve their durability in industrial applications.

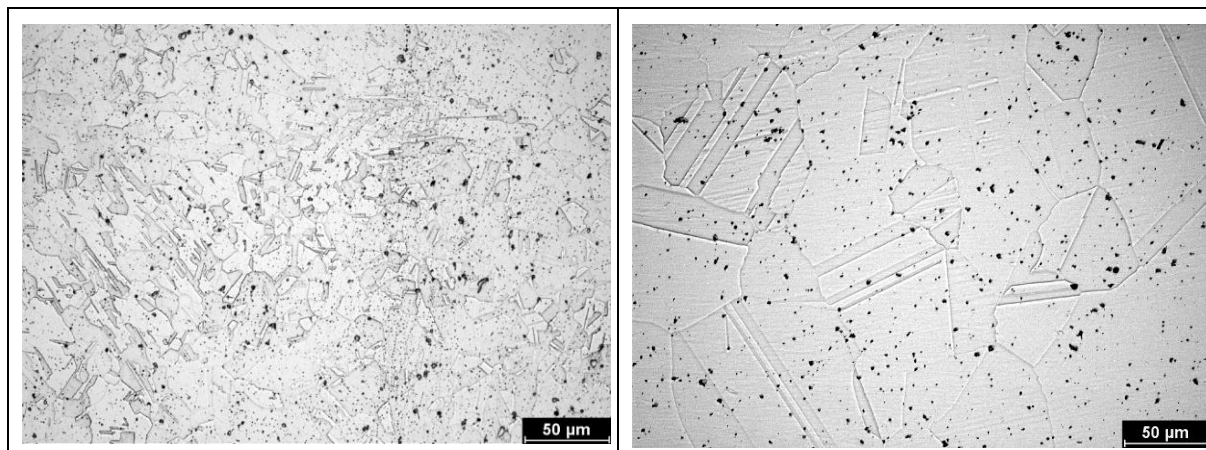
Úvod

Mechanické vlastnosti materiálů lze hodnotit pomocí miniaturních zkušebních vzorků v případech, kdy je k dispozici omezené množství experimentálního materiálu. Pevnost v tahu, rázová vrubová houževnatost, lomová houževnatost, creep a vysokocyklová únava jsou nejzákladnější a nejdůležitější vlastnosti pro hodnocení životnosti součástí. Každá z těchto technik je jinak citlivá na proces degradace materiálu. Proto je nutné pečlivě zvolit nejvhodnější metodu s ohledem na množství dostupného materiálu a různé velikosti vzorků pro každou zkoušku. Cílem této studie bylo najít optimálně citlivou mechanickou zkoušku pro detekci degradace konkrétních materiálů SUPER 304H a HR3C, které se používají na teplosměnné plochy progresivních nebo nadkritických elektráren, konkrétně pro přehříváky.

Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byl zajištěn polotovár ve formě trubky rozměrech 38×6,3 mm z materiálů SUPER 304H a HR3C, které jsou v České republice již použité. Materiál SUPER

304H na Tušimicích 2 a na Pruněrově 2. Materiály HR3C a SUPER 304H jsou použité na nový zdroj Ledvice. Metalografie obou materiálu v dodaném stavu je na Obr. 1.



a)

b)

Obr. 1: Materiál S304H velikost zrna G=8 (a), materiál HR3C velikost zrna G=5 (b)

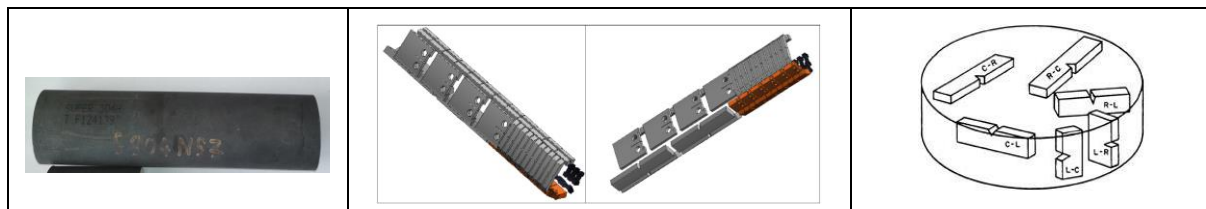
Pro experiment byly použity trubky v dodaném počátečním stavu a pro potřeby experimentu byly polotovary dále tepelně degradovány při teplotě 675 °C po dobu 20 až 10 000 hodin. Doba jednotlivých expozic je uvedena v Tab. 1. Původně se počítalo s degradací jen 3 000 a 10 000 hodin, ale z důvodu toho, že materiál HR3C vykazoval po 3 000 hodinách velké změny mechanických vlastností, byly provedeny ještě kratší expozice po dobu 20 až 500 hodin.

Tab. 1: Doba jednotlivých expozic degradace pro stav 1 až 5

Stav materiálu	Teplota	Doba expozice
	°C	hod
Počáteční stav	----	0
Stav expozice 1	675	20
Stav expozice 2	675	100
Stav expozice 3	675	500
Stav expozice 4	675	3 000
Stav expozice 5	675	10 000

Zkušební tělesa

Z důvodu velikosti dodaných polotovarů byla pro určení mechanických vlastností použita miniaturizovaná zkušební tělesa. Byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušku tahem, zkoušku šíření trhliny a zkoušku lomové houževnatosti. Dodaný polotovar, rozřezový plán, umístění a orientace zkušebních těles je uvedeno na Obr. 2.



Obr. 2: Dodaný polotovar, rozřezový plán, umístění a orientaci zkušebních těles

Zkoušky tahem

Zkouška tahem při pokojové teplotě miniaturizovaného tělesa s průřezem 1×0,5 mm je prováděna na zkušebním stroji TiraTest se silovou kapacitou 10 kN. Deformace je měřena pomocí jednokamerového optického snímače deformace MERCURY RT založeného na bázi digitální

obrazové korelace (DIC). Zkušební sestava je vyobrazena na Obr. 3. vlevo, vpravo je pak detail uchyceného zkušebního tělesa.



Obr. 3: Zkušební sestava pro zkoušku tahem (vlevo) a detail zkušebního tělesa (vpravo)

Výsledky zkoušek tahem pak mohly být porovnány mezi sebou. Výsledky zkoušek tahem jsou uvedeny v Tab. 2. Hodnoty meze pevnosti se mírně zvyšují a hodnoty tažnosti se mírně snižují.

Tab. 2: Výsledky zkoušek tahem pro materiály S304H a HR3C pro jednotlivé stavy expozice

Materiál	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %	Z
SUPER 304H					
Počáteční stav	309	616	36,4	52,7	76,1
Stav expozice 4	374	731	32,7	48,8	69,5
Stav expozice 5	380	754	29,2	40,6	65,3
HR3C					
Počáteční stav	352	764	37,5	56,1	75,9
Stav expozice 1	402	789	35,5	43,8	67,1
Stav expozice 2	369	778	35,3	41,7	57,8
Stav expozice 3	365	769	32,3	37,5	45,6
Stav expozice 4	430	810	26,1	31,7	41,1
Stav expozice 5	433	806	24,8	27,3	35,0

SUPER 304H

HR3C

Zkoušky lomové houževnatosti

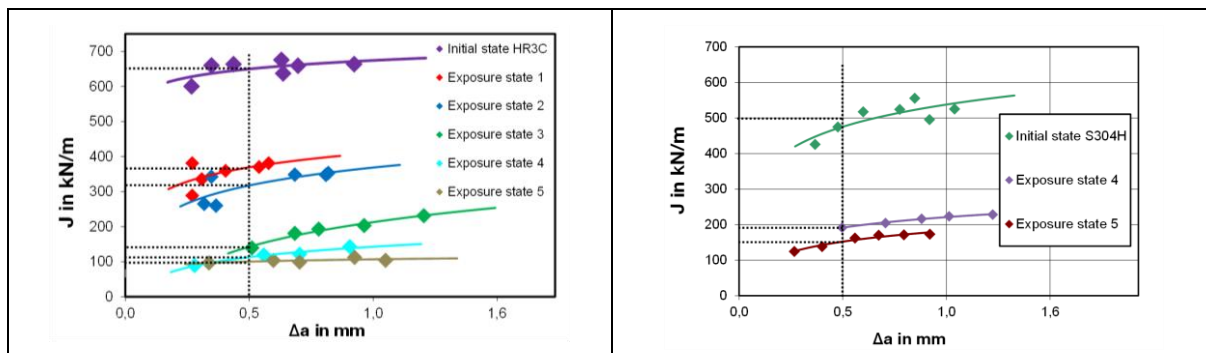
Zkoušky lomové houževnatosti byly provedeny dle ASTM E1820-16 (Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness) při pokojové teplotě. Zkušební tělesa jsou zobrazena na Obr. 3. Orientace zkušebního tělesa byla podélná a tangenciální. Vzorky byly nakmitány na magneto-rezonančním stroji Rumul při pokojové teplotě. Výsledná délka trhliny po nakmitání byla $a/W \sim 0,5$ s finálním faktorem intenzity napětí K 16 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Po nakmitání vzorků byly na vzorcích obrobena boční vruby o hloubce 1 mm z každé strany. J-R křivky byl stanovené metodou více zkušebních těles. COD snímač byl v poloze Load-Line. Rychlost zatěžování 0,5 mm/min. Délka nakmitané trhliny a jejího tvárného nárůstu byla změřena pomocí optické kamery. Zkoušky byly provedeny na servo-hydraulickém zkušebním stroji ATT se silovou kapacitou 250 kN a s kontaktním extenzometrem Epsilon.

Diskuze výsledků

Vzorky s vrubem a trhlinou orientovanými podél trubek vykazovaly menší hodnoty lomové houževnatosti vzhledem ke shodnému směru s vlákny materiálu. Austenitická ocel Super 304H vykazovala oproti výchozímu stavu propad lomové houževnatosti o 60 a 65 procent pro L-C a C-L orientaci při degradačním stavu 4 (675 °C/3 000 hodin). Následná degradace na stav 5 (10 000 hodin) při teplotě 675 °C stupňů znamenala propad hodnoty o dalších 5 a 10 %. Nicméně tato další degradace už neznamenala tak vysoký propad.

U austenitické oceli HR3C se ukázalo, že propad lomové houževnatosti v degradačním stavu 4 a5, už je příliš výrazný a materiál se nacházel ve stavu kompletního degradačního stavu. Bylo tedy třeba expoziční dobu zkrátit pro přesnější monitorování průběhu degradace tohoto materiálu. Celkem tedy bylo provedeno dalších 5 expozičních řezů s expozičními časy ležícími pod 3 000 hodin. V těchto řezech byl sledován postupný pokles lomové houževnatosti s degradací

materiálu. Expoziční čas 3 (500 hodin) znamenal pokles na spodní prahovou hodnotu lomové houževnatosti a další časy už na pokles vliv neměly. Jako u předešlé austenitické oceli i lze je jasně vidět, že miniaturizované vzorky lze použít pro velmi citlivou analýzu aktuálního stavu degradace materiálu. Porovnání jednotlivých výsledků je uvedené na Obr. 4.



a) HR3C

b) S304H

Obr. 4: Porovnání výsledků lomové houževnatosti pro materiál HR3C (a) a S304H (b)

Závěr

Článek se zabývá možnostmi výběrem konkrétní materiálové zkoušky nejvhodnější pro zachycení prvního náznaku degradace. Pro degradační stav austenitických materiálů SUPER 304H a HR3C bylo použito několik mechanických zkoušek. Vzhledem k omezenému množství materiálu musela být použita technika mini vzorků. Zkouška lomové houževnatosti byla schopna zachytit degradaci i po velmi krátké době (20 hodin pro HR3C). Ostatní zkoušky jsou rovněž schopny prokázat nebo alespoň naznačit degradaci materiálu, jejich citlivost je však mnohem nižší.

Poděkování

Tento článek je spolufinancován ze státního rozpočtu Technologickou agenturou České republiky v rámci programu THÉTA, projekt TK05020109, Hodnocení životnosti přehřívacích tepelných elektráren.

POUŽITÍ SCREENINGOVÉ METODY PECT PŘI KONTROLE MEMBRÁNOVÝCH STĚN A JEJÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ

APPLICATION OF THE PECT SCREENING METHOD IN MEMBRANE WALL INSPECTION AND ITS POSSIBLE APPLICATIONS

Jiří Tomas

ANS NDT Czech s.r.o., Paškova 690/54, 717 00 Ostrava

Abstrakt

Využívání štěpky a jiných přírodních a alternativních paliv při spalování v kotlích s sebou přináší i negativní jevy a vlivy na provozní životnost kotle a poškození membránových stěn a kotlových trubek. Projevuje se úbytek materiálu na stěnách trubek zapříčiněný různými vlivy a roste poptávka a potřeba rychlého zjištění stavu stěn. Rychlé zjištění stavu má vliv na provoz kotle jeho odstávky a v konečném důsledku na plánování a efektivitu celkového provozního režimu. Včasné opravy prodlouží životnost a výměna napadených dílů zvýší celkovou bezpečnost provozu.

V příspěvku je popsán způsob použití screeningové metody PECT a její výhody při skenování trubek v kotlích.

Abstract

The use of wood chips and other natural and alternative fuels in boiler combustion brings with it negative phenomena and effects on the operating life of the boiler and damage to the membrane walls. The loss of material on the tube walls due to various influences is becoming apparent and there is an increasing demand and need to quickly determine the condition of the walls. Rapid condition detection has an impact on boiler shutdown operations and ultimately on the planning and efficiency of the overall operating regime. Timely repairs will extend service life and replacement of affected parts will increase overall operational safety.

This paper describes the use of the screening method and its advantages in boiler tube scanning.

Úvod

Screeningové metody jako takové nacházejí různá uplatnění dle použité technologie kontroly, dle použitých fyzikálních systémů a vycházejí z jejich možností při kontrole. Provedený screening slouží pro celkovou představu o stavu zařízení. Jedná se o prvotní pohled na stav systému jako takový.

Z celkového pohledu na tuto screeningovou metodu je zcela na místě naše představa zaplňování bílé tabule. A to umístěním zeslabených míst a možná i míst kritických, tak že získáme celkový přehled pro následnou kontrolu jinými NDT prostředky, či výměnu poškozených míst.

Na počátku známe jen některé vstupy, jako jsou tloušťky stěny a materiál. Mnohdy ale ani to ne. Zvláště u starších zařízení, kdy veškeré provozní detaily o opravách, poruchách a provedených změnách jsou ztraceny v propadlišti dějin, začínáme opravdu od nuly.

Při našem využití screeningové metody PECT pro kontrolu tloušťek se v tomto příspěvku zaměříme na kotlové trubky a jejich kontrolu stěn.

Vnitřek kotle je pro laiky něco těžko představitelného. V reále je vnitřek kotle a povrch trubek pokryt nánosy prachem a nálepy. Je to něco špinavého, zaprášeného, těžko přístupného. Což je pravda.

Použití klasických ultrazvukových tloušťkoměrů je velmi omezeno. Prakticky je nemožná rychlá a efektivní kontrola ve větším rozsahu. Zvláště při nálepech na trubkách už jen vybroušení měřicí plochy je velmi pracné a poskytne nám velmi omezenou informaci o tloušťce stěny vzhledem k velké ploše stěn kotle a k délkám trubek.

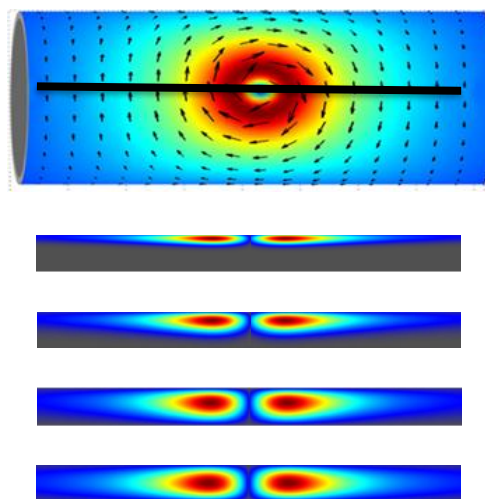
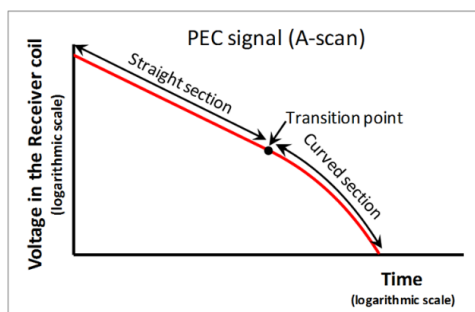
I použití ostatních UT metod naráží vždy na problém stavu povrchu na trubce – prach, spečeniny, nálepy a na nutnost použití vazebního prostředku.

Princip použití metody PECT [1]

Základní výhoda – není nutná úprava povrchu

Metoda PECT není metoda ultrazvuková. Je to metoda pulsních vířivých proudů založená na generování magnetických polí a jejich průchodu feromagnetickým materiálem. Důležité jsou tedy elektromagnetické vlastnosti materiálu, jako je permeabilita a susceptibilita. Ta nám ovlivňuje průchod a generování polí.

Rovná část křivky je část kdy pole přechází materiálem, bod zlomu je v okamžiku dosažení konce stěny materiálu.



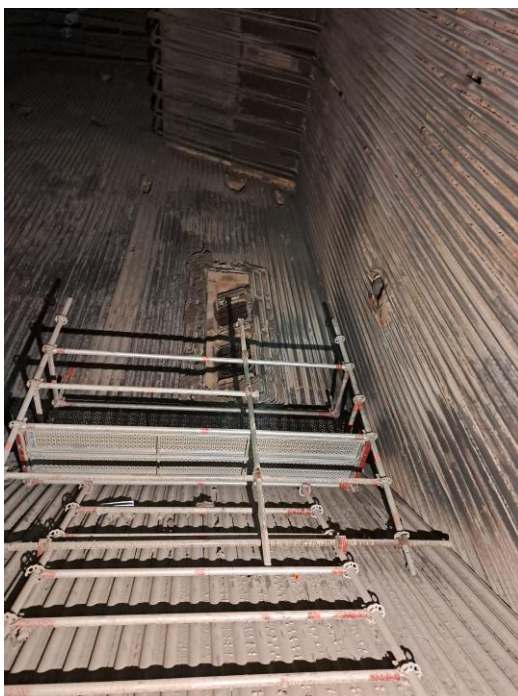
Obr. 1: Křivka průchodu stěnou

Obr. 2: Generované pole při průchodu stěnou

Odlišnost od UT – na rozdíl od ultrazvuku neměříme absolutní hodnotu stěny nýbrž průměrnou hodnotu tloušťky stěny pod plochou působení magnetického pole.

To, že není nutná příprava povrchu a použití vazebního prostředku nám v tomto případě dává možnost využití metody pro rychlý screening trubek v kotli vzhledem k podmínkám a prostředí tam panujícím. Jak se nám potvrdilo, dosažené výsledky odpovídají realitě.

Postup při screeningu kotle – Elektrárna Mělník



Obr. 3: Měřené místo, K6, EME

EME – diagnostika varných trubek v kotli K6

Úkol při této diagnostice byl – prověření varných trubek v okolí hořáku a nalezení kritických míst na stěně kotle. Použili jsme metodu PECT se speciálně upravenou podložkou a měření jsme prováděli ručně z postaveného lešení. Měřili jsme jak stěnu kolem okolí hořáku, tak část boční stěny.

Jednotlivé trubky byly označeny a sonda byla přikládána po celé délce měřeného úseku.

Na každém měřeném místě byly provedeny tři měření sondou v místě přístupu na trubce (A,B,C) pro co nejlepší potvrzení měřené hodnoty.

Měřena byla hodnota tloušťky stěny v daném místě.

	28			27			26			25			Levá strana kotle			24		23	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
1	5,7	5,3	5,8	5,0	4,9	4,8	4,7	4,9	5,0	4,8	4,7	4,5	4,5	4,8	4,5			4,3	4,4
2	5,3	5,1	5,1	4,9	5,0	5,0	4,7	4,6	4,8	4,5	4,5	4,4	4,5	4,7	4,5			4,6	4,6
3	5,6	5,5	5,6	4,7	4,9	4,9	4,8	4,7	4,8	4,5	4,5	4,5	4,8	4,6	4,8			4,5	4,7
4	5,3	5,3	5,5	4,8	4,9	4,9	5,0	4,9	4,9	4,3	4,4	4,4	4,3	4,5	4,5			4,5	4,6
5	5,2	5,0	5,0	4,8	5,0	5,0	4,9	5,0	5,0	4,4	4,4	4,5	4,4	4,7	4,7			4,6	4,6
6	5,3	5,5	5,4	4,7	4,7	4,6	5,2	5,1	5,1	4,4	4,4	4,4	4,3	4,6	4,5			4,6	4,7
7	5,7	5,5	5,4	5,1	4,9	4,8	5,1	5,1	5,2	4,5	4,4	4,4	4,1	4,5	4,5			4,4	4,7
8	5,1	4,9	4,9	5,0	5,1	5,0	5,0	5,0	5,1	4,6	4,5	4,4	4,3	4,3	4,3			4,5	4,8
9	5,0	4,8	4,7	4,8	4,8	4,7	5,2	5,1	5,2	4,6	4,5	4,5	4,4	4,4	4,3			4,6	4,9
10	5,0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	5,0	5,2	5,1	4,8	4,6	4,5	4,7	4,7	4,5			4,7	5,0
11	4,9	4,8	4,8	5,1	5,1	4,8	5,2	5,3	5,3	4,5	4,6	4,4	4,6	4,8	4,5			4,6	4,9
12	4,9	4,7	4,8	5,1	5,2	5,0	5,1	5,4	5,3	4,6	4,7	4,6	4,8	4,8	4,6			4,4	4,5
13	4,9	4,8	4,9	5,2	5,2	5,0	5,0	5,2	5,1	4,6	4,6	4,6	4,5	4,8	4,6			4,4	4,3
14	4,8	4,7	4,7	4,9	4,7	4,4	4,8	4,8	4,9	4,5	4,5	4,4	4,5	4,6	4,5			4,4	4,4
15	6,4	6,6	6,7	6,3	6,3	6,3	4,2	4,8	4,7	4,5	4,5	4,5	4,3	4,4	4,4			4,4	4,6
16	6,3	6,3	6,3	6,5	6,5	6,4	4,9	4,8	4,3	4,5	4,5	4,5	4,4	4,5	4,5			4,6	4,8
17	6,6	6,7	6,6	6,4	6,4	5,8	4,7	5,0	4,9	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6	4,6			4,4	4,6
18	6,6	6,6	6,7	6,4	6,5	6,5	5,2	5,2	5,1	4,4	4,5	4,3	4,4	4,5	4,5			4,5	4,8
19	6,5	6,5	6,4	6,6	6,5	6,5	3,8	4,9	4,7	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5			4,6	4,5
20	6,2	6,3	6,4	6,5	6,5	6,4	5,1	5,1	5,1	4,4	4,4	4,3	4,3	4,4	4,3			4,4	4,4
21	5,9	5,9	6,7	5,7	6,3	6,6	5,2	5,2	5,2	4,5	4,4	4,3	4,3	4,3	4,2			4,4	4,6
22	6,3	6,3	6,6	6,1	6,1	6,0	5,3	5,4	5,1	4,7	4,8	4,5	4,4	4,4	4,3			4,4	4,6
23	6,3	6,3	6,5	5,9	5,9	5,8	5,0	5,0	5,3	4,6	4,7	4,5	4,4	4,5	4,4			4,3	4,5
24	5,8	6,0	6,3	6,3	6,4	6,4	4,7	4,4	4,8	4,5	4,6	4,5	4,7	4,8	4,6			4,5	4,6
25	4,9	4,7	7,2	6,3	6,4	6,4	4,4	4,9	4,9	4,5	4,6	4,5	4,5	4,5	4,4			4,5	4,6
26	5,5	5,5	6,2	6,4	6,3	6,4	5,1	4,9	4,9	4,5	4,5	4,5	4,5	4,7	4,8			4,4	4,4
27	4,6	4,0	5,3	6,2	6,2	6,1	5,2	5,3	5,2	4,6	4,5	4,6	4,6	4,4	4,4			4,5	4,5
28	4,4	3,9	4,6	6,1	6,1	6,1	5,7	5,7	5,5	4,5	4,6	4,4	4,6	4,5	4,5			4,6	4,7
29	5,8	5,9	6,4	5,8	5,9	5,9	5,7	5,8	5,6	4,6	4,5	4,5	4,4	4,6	4,6			4,6	4,5
30	6,2	6,3	6,4	5,1	4,9	4,9	5,1	5,3	5,7	4,6	4,9	4,9	4,4	4,2	4,6			4,7	4,7
31	6,0	6,1	6,4	4,7	4,4	4,5	5,7	5,7	5,6	4,9	4,9	4,9	4,5	4,7	4,6			4,7	4,8
32	5,4	5,5	5,9	3,9	3,6	4,0	5,8	5,8	5,7	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9			4,6	4,8
33	5,1	5,1	5,5	4,4	4,4	4,7	5,8	5,8	5,7	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9			4,6	4,8
34	5,3	5,2	5,5	5,6	5,6	4,9	5,8	5,8	5,7	5,0	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9			4,8	4,9
35	5,3	5,3	5,4	5,2	5,2	5,1	5,5	5,5	5,7	5,1	5,0	4,9	5,0	5,0	4,9			5,2	5,4
36	5,3	5,3	5,5	5,3	5,3	5,2	5,5	5,5	5,5	5,2	5,1	5,0	5,1	5,1	5,0			5,2	5,4
37	5,2	5,2	5,6	5,5	5,4	5,3	5,5	5,5	5,7	5,2	5,1	4,9	5,2	5,1	5,0			5,1	5,5
38	5,0	5,2	5,6	5,6	5,6	5,5	5,5	5,5	5,5	5,3	5,2	5,1	5,1	5,2	5,0			5,0	5,5
39	5,2	5,4	5,6	6,2	6,2	6,2	4,8	5,7	5,5	5,0	5,2	4,8	5,4	5,3	5,1			5,2	5,3
40	5,3	5,7	6,4	6,4	6,3	6,3	5,4	5,4	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1	4,8			5,0	5,2
41	4,3	4,6	5,8	6,4	6,4	6,5	5,6	5,4	5,2	5,0	5,1	4,8	5,2	5,2	5,2			5,1	5,2
42	4,4	5,4	5,9	5,4	5,3	5,1	5,4	5,3	5,0	5,0	5,1	5,0	4,9	4,9	4,9			5,1	5,2
43	4,4	4,8	6,2	4,2	4,3	4,1	6,1	6,1	6,0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4			4,0	4,3
44	4,1	3,8	4,0	4,1	4,3	3,8	5,0	3,9	4,2	4,7	4,7	4,6	4,5	4,6	4,6			4,4	4,3
45	5,5	5,4	5,2	4,6	4,6	4,3	4,9	4,7	5,0	4,8	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6			4,2	4,5
46	4,4	4,1	4,4	4,3	4,5	4,2	3,2	3,1	4,0	4,8	4,7	4,6	4,8	4,7	4,6			4,3	4,5
47	3,8	3,5	3,3	4,2	4,3	4,0	5,2	5,3	6,3	4,6	4,5	4,6	4,6	4,5	4,6			4,3	4,3
48	4,7	4,0	4,0	4,7	4,8	4,3	5,8	5,9	5,9	4,6	4,6	4,5	4,6	4,6	4,5			4,3	4,4
49	5,1	5,0	5,4	4,4	4,6	4,4	6,1	6,0	6,0	4,6	4,4	4,3	4,6	4,4	4,3			4,3	4,3
50	5,8	5,9	6,2	3,9	4,0	3,9	6,1	6,3	6,1	4,6	4,5	4,5	4,6	4,5	4,5			4,4	4,3

A Nejmenší UT naměřené hodnoty tl. stěny - poz. 44 - 2,0 mm, poz. 47 - 3,4 mm



Obr. 4: Výťah ze záznamu z měření a foto okolí hořáku

Při měření byla nalezena možná kritická, nebo zeslabená místa na stěně kotle.

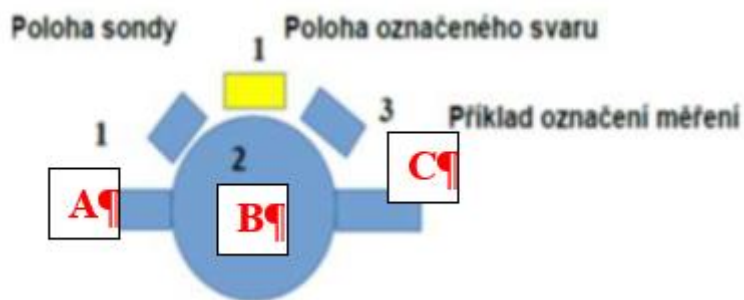
Provedení konečné zprávy vyžaduje důkladné prověření výsledků ve vztahu k pozicím, trubkám a měřeným kalibračním bodům. Proto konečná zpráva je obvykle uzavřena následně.

Nicméně, kontrolním proměřením nejmarkantnějších zeslabení, viditelných ihned při měření jsme zjistili shodu v rámci měřicí tolerance.

Trubka č. 28, pozice 47 – naměřeno 3,4 mm UT

Nálezy zeslabení na jednotlivých varných trubkách byly prověřeny následovně – trubka č. 26, 27, 28, byl proveden její výřez a místo nálezu bylo proměřeno laboratorně a výsledek byl srovnán s hodnotami získanými při měření.

Viz.: Porovnání výsledků měření s realitou, závěr.



Obr. 5: Způsob přikládání sondy na měřeném místě

Postup při screeningu kotle – kotel Třeboradice – diagnostika membránových stěn

Při tomto měření byl stanoven úkol proměření stěn kotle do místa dosahu ze dna kotle a detailní proměření trubek okolo hořáku. Stěna oproti hořákům byla proměřena i z lešení do výšky dosahu.

Při měření jsme na vybraných trubkách použili stejný způsob měření jako v EME.

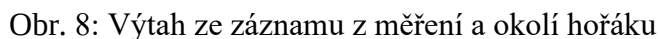
Kotlové stěny nebyly proměřeny 100%, ale systémem 2 měřené a 4 vynechané trubky.

Nicméně i tento způsob měření poskytl obraz o stavu stěn kotle.

Okolí kolem hořáku bylo proměřeno kompletně.



Obr. 6: Označení měřených trubek na stěně č. 2



Barevná stupnice	% úbytku
5	
4,0	0
3,6 - 4,0	-10%
3,2 - 3,6	-20%
2,8 - 3,2	-30%

Obr. 9: Barevná stupnice pro vizualizaci úbytku materiálu



Obr. 10: Možné použití automatizovaného nosiče sond pro skenování trubek kotle po celé výšce (délce). Lze použít i pro šikmý sklon trubek membránové stěny.

Porovnání výsledků měření s realitou, závěr

Porovnání jsme provedli na výřezu trubek č. 26 a 28 z kotle K6, EME. Použitím kalibračního bodu umístěného přímo na vyřezané trubce jsme dosáhli maximální přesnosti měření PECT.

Potvrdila se správnost měření ve smyslu nalezení zeslabení a ve smyslu nalezení obdobných hodnot zeslabení.



Obr. 11: Porovnání hodnot měřených v kotli a hodnot měřených na výřezu trubky, trubka č. 26, K6, EME

Kotel Třeboradice, záložní plynový zdroj

Na naměřených hodnotách v kotli Třeboradice metodou PECT bylo provedeno následovné porovnání.

Protože Metodou PECT neměříme absolutní hodnoty, provedli jsme následující srovnání mezi hodnotami měřenými v kotli a hodnotami měřenými UT tloušťkoměrem. Na nálezech ve stěnách II., III. a IV. jsme provedli měření UT tloušťkoměrem a výsledné hodnoty jsme porovnali s hodnotami měřených tloušťek metodou PECT.

Závěr tohoto srovnání je následující: rozdíl měření PECT a reálné tloušťky mezi UT měřením je cca 8%.

CELKOVÝ ZÁVĚR

Byly provedeny i jiné testovací měření metodou PECT na jiných varných trubkách i na jiných výřezích trubek, rovněž i pro Dia 35×5 mm, se závěrem, že vždy je touto screeningovou metodou možno identifikovat zeslabení a nálezy na kotlových trubkách.

Reference

[1] MAXWELL NDT BV. *Dr Paul Crouzen, presentation*. The Netherlands, 2023.

AKUMULACE TEPELNÉ ENERGIE – VÝVOJ, AKTIVITY A PILOTNÍ JEDNOTKY

HEAT ENERGY ACCUMULATION – DEVELOPMENT, ACTIVITIES AND PILOT UNITS

Otakar Frýbort a Tomáš Melichar

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Akumulace tepelné energie je princip skladování energie umožňující ukládání velkých kapacit energie při velkých vstupních a výstupních výkonech. Koncepty uvažující ukládání tepla na vysokých teplotách pak umožňují zpětné využití uložené energie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Taková technologie pak může přispět k dekarbonizaci energetiky a průmyslu, zvýšení využitelnosti obnovitelných zdrojů nebo zvýšení životnosti energetických technologických celků. V přednášce budou představeny perspektivní koncepty pro akumulaci vysoko-potenciální tepelné energie a možnosti aplikace v kombinaci s různými zdroji energie včetně obnovitelných, fosilních nebo jaderných. Představeny budou dále experimentální aktivity Centra výzkumu Řež, včetně probíhající realizace velké pilotní jednotky pracující s roztavenými solemi jako akumulacním materiálem, která bude postavena v areálu Teplárny Mělník a bude propojena se stávající teplárenskou infrastrukturou.

Abstract

Thermal energy storage is an energy storage principle enabling the storage of large energy capacities at large input and output powers. Concepts considering the storage of heat at high temperatures then enable the reuse of the stored energy for the combined production of electricity and heat. Such technology can then contribute to the decarbonization of energy and industry, increase the usability of renewable resources or increase the lifetime of energy technological units. The lecture will present perspective concepts for the accumulation of high-potential thermal energy and the possibilities of application in combination with various energy sources, including renewable, fossil or nuclear. The experimental activities of the Research Centre Řež will also be presented, including the ongoing implementation of a large pilot unit working with molten salts as storage material, which will be built on the grounds of the Mělník Thermal Plant and will be connected to the existing thermal plant infrastructure.

EVROPSKÝ PROJEKT OFFERR: PŘÍNOSY PROJEKTU PRO PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI JE V EU

EUROPEAN PROJECT OFFERR: PROJECT BENEFITS FOR EXTENDING THE LIFETIME OF THE NPPS IN THE EU

Jiří Žďárek

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Cílem EU projektu OFFERR je propojit výzkumná zařízení a výzkumné týmy v EU a realizovat výzkumné projekty v definovaných výzkumných oblastech. Jako nejdůležitější byly definovány dvě oblasti:

- Prodloužení životnosti stávajících JE.
- Vývoj SMR a AFR.
- Třetí rovněž důležitá oblast je: Vývoj pokročilých typů paliva.

V prezentaci budou stručně popsány již schválené projekty v uvedených třech oblastech. Vzhledem k hlavnímu tématu konference je důležité mít informace o uvedených projektech v EU. Mezi již vybranými organizacemi z ČR, v uvedených klíčových oblastech jsou: VZÚ Plzeň, ÚJV Řež, CV Řež a ČVUT v Praze. Vybrané a schválené projekty jsou financovány z prostředků EC.

Abstract

Main target of the EU project OFFERR is to find cooperation between research facilities and Research Teams from the EU and realise projects in defined Research areas. As most important were defined two areas:

- Light water reactor sustainability.
- Development of the SMR and AFR.
- The third very important area is: Development of advanced types of fuels.

In the presentation are briefly described already approved projects in three above mentioned areas. With respect to the main target of the SRNÍ-24 conference it is important to have information about mentioned project areas in the EU. Between selected organisations in the Czech Republic with approved projects in most important areas are: VZÚ Pilsen, UJV Rez, CV Rez and CTU in Prague. Selected and approved projects are financed from the EU.

Anotace OFFERR LWRS projektů po třetí výzvě

CSPEL: LWRS – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: VZÚ Plzeň

Výzkumný tým: EDF France

Primární zaměření je systematický vývoj CS (Cold Spray) technologie k prodloužení životnosti LWR komponent. Na rozdíl od stávajících technologií (Plasma, HVOF, Arc, Flame atd.) je minimální teplotní vliv na ošetřovaný povrch. K dosažení definovaných cílů bude provedena systematická optimalizace vybraných parametrů nástřiku pro nejdůležitější materiály používané pro LWR: nerez ocel 316 L a nikl based superalloy Inconel 625. Vhodná procedura bude vybrána a testována na připravených vzorcích s trhlinami. Následně bude vyhodnocena kvalita nástřiku.

ACCURATE: LWRS – Thermohydraulic Research Area

Organizace poskytující zařízení: PSI Switzerland

Výzkumný tým:

Vývoj CFD kódu pro hodnocení průběhu varu chladicího media v typických podmínkách reaktoru. Měření bude provedeno na experimentálním zařízení COSMOS-H až do krize varu, speciální optickou metodou.

ZETA - SOS: LWRS – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: VTT Finland

Výzkumný tým: EdF France

Usazování korozních produktů, zejména magnetitu Fe_3O_4 v PG je výrazným nebezpečím pro životnost PG. Tomuto jevu lze zabránit. Projekt ZETA-SOS je zaměřen na hodnocení zeta-potenciálu, jenž vyjadřuje míru ochoty sedimentovat dispergované částice. V projektu budou zkoumány dispergované korozní produkty typické pro II.O. JE a medium prostředí II.O. alkalizované různými těkavými aminy a s přidavkem polyakrylátové kyseliny v roli disperzantu. Výstupy jsou důležité jako součást výzkumu zanášení PG v JE.

SAP-KROTOS-01: LWRS – Safety Research Area

Organizace poskytující zařízení: EdF France

Výzkumný tým: Germany

Vytvořit způsob zaplavení šachty reaktoru při těžké havárii s chlazením vytékajícího Coria tak, aby nedošlo parní explozi a uvolnění radioaktivity do vnějšího prostředí. Bude vytvořena možnost přidání super-absorbing polymers (SAP) do chladicí vody.

NIPES: LWRS – Radiochemistry Research Area

Organizace poskytující zařízení: ÚJV Řež, a. s.

Výzkumný tým: UNIBO Italy

Prodloužení životnosti kabelů v JE je zásadně důležité. Bude studováno použití vrstvy polymeru na izolaci kabelů. Bude hodnocen vliv radiace na různé typy polymer izolace XLPE, PVC a EPDM.

CHALEUR: LWRS – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: SCK CEN Belgium

Výzkumný tým: EdF France

Bude provedeno hodnocení výroby těžkých výkovků z low-alloyed steels. Snížení konzervatismu v hodnocení je možné vyhodnocením mechanických vlastností oceli v relaci na výrobní postup. Každý z výrobních postupů (např. lití, svařování atd.) ovlivňuje mikrostrukturu a následné mechanické vlastnosti.

HyAMsteel: LWRS – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: NTNU Norway

Výzkumný tým:

Standartní výroba komponent vyžaduje dlouhodobou i finanční náročnost. Technologie AM: Additive Manufacturing je potenciální a výhodnou novou technologií. Laser-based powder bed

fusion (LPBF) je jedinečnou AM technologií s potenciálem vyrobit komponenty jednorázovou technologií a s výrazným snížením výrobního řetězce.

FUND: LWRS – NPP Safety Research Area

Organizace poskytující zařízení: IRSN France

Výzkumný tým:

Cílem FUND projektu je zlepšit využití výpočetního kódu CFD (Computational Fluid Dynamics) pro hodnocení rizika požáru v JE. Vývoj chemického modelu může lépe předpovědět neventilované výbušné režimy s možností výskytu v budovách JE.

Anotace OFFERR Advanced Fission Reactors concepts projektů po třetí výzvě

STORM: Advanced Fission Reactors concepts – NPP Safety Research Area

Organizace poskytující zařízení: Germany

Výzkumný tým: Framatome

Cílem navržených experimentů na experimentálním zařízení EPICUR je lépe porozumět iodide chování a zejména volatide iodide v iPWR havarijních podmínkách. Tento projekt bude proveden na základě vstupních údajů získaných z EU SASPAM-SA projektu, který byl zaměřen na iPWR havarijní podmínky. Cesium iodide (CsI) je navržen jako základní materiál.

AFR: Advanced Fission Reactors concepts – Neutronic Research Area

Organizace poskytující zařízení: France

Výzkumný tým: SCK – CEN Belgium

Organizace NAAREA projektuje XAMR molten salt reaktor (MSR) s použitím chloride based paliva. Cílem je vytvořit nízko uhlíkové teplo a výkon s aplikací recyklace jaderného odpadu. Tato inovace by umožnila vytvořit nový zdroj energie a dosáhnout nízké emise uhlíku.

HeW: Advanced Fission Reactors concepts – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: PSI Switzerland

Výzkumný tým:

Integrace tungsten v AFR představuje revoluci v jaderné technologii. Jeho pevnost, teplotní odolnost, tolerance radiace, neutronová ekonomika a kompatibilita s pokročilou technologií chlazení potvrzuje tungsten jako kandidáta pro zvýšení jaderné bezpečnosti, efektivity a dlouhodobé životnosti.

CORREx: Advanced Fission Reactors concepts – Neutronic Research Area

Organizace poskytující zařízení: SCK-Cen Belgium

Výzkumný tým: CEA France

CORREx experiment (Complement to the Reactor Rate Experiments) je cílen na identifikaci energetického rozsahu. Předem vypočítané rychlosti fúze budou porovnány s měřenými hodnotami. Použití speciálních filtrů BN a B4c pro spektra fúze je zásadním přínosem CORREx projektu.

CDIHOSMEA: Advanced Fission Reactors concepts – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: NOMATEN Poland

Výzkumný tým: VTT Finland

Nutnost materiálů s vysokou teplotní a radiační odolností byla zintenzivněna rapidním vývojem jaderné technologie. Relativně nedávno nové slitiny oxide-dispersion-strengthened medium-entropy (ODS-MEAs) byly vytvořeny pro tyto aplikace. Cílem projektu je vyhodnotit ODS-MEAs po radiaci při vysokých teplotách.

Anotace OFFERR Advanced Nuclear Fuels projektů po třetí výzvě

SPCMIAFF: Advanced Nuclear Fuels – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: UNIPI Italy

Výzkumný tým: Lithuania, Germany, Spain, ČR, SW

Zr slitina nanosená různými nástriky na palivové články je primárním kandidátem pro Accident Tolerant Fuel (ATF). Základním cílem nástriku je zmenšit intenzivní chemickou interakci mezi párou a zirkoniem v průběhu havárie. Omezená chemická interakce umožní pomalejší ohřev paliva při LOCA havárii a zmenší produkci vodíku. Navrhovaný výzkum je zejména zaměřen na chování ATF v případě havárie s vysokými teplotami.

DDAFC: Advanced Nuclear Fuels – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: CV Řež

Výzkumný tým: PAS Lab

V průběhu projektu budou analyzovány hustoty defektů v různých nástricích ZrNb povlaků paliva pomocí pozitron anihilation spektroskopie (PAS). Vzorky budou připraveny z různých částí vzorku po creepu nebo přetlakových testech, umožňující určit rozložení hustoty a typu defektů s ohledem na geometrii vzorků, chemická složení, mikrostrukturu, tepelného namáhání a podmínek testů. Rovněž bude použita transmisní elektronová spektroskopie.

CODEX-ATF-AIT: Advanced Nuclear Fuels – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: KIT Germany

Výzkumný tým: ČVUT v Praze, LEI, GRS

Výzkum na ATF materiálech je v současné době prováděn celosvětově. Cr-coated Zr slitiny patří mezi velmi oceňované ATF povlaky. Značné množství dat je získáno o degradaci při vysokých teplotách. Zatím nejsou k dispozici data o chování těchto nástriků pod vlivem vzduchu (air ingress). S tímto cílem bude využito zařízení CODEX pro testy Cr nástriků s vlivem air ingress.

COATED: Advanced Nuclear Fuels – Thermohydraulic Research Area

Organizace poskytující zařízení: ČVUT v Praze

Výzkumný tým: KIT Germany

V rámci projektu bude hodnoceno chování ATF v podmínkách kritického teplotního toku (CHF). Výzkumný tým poskytne experimentální vzorky paliva s nástrikem Cr, které budou testovány v různých podmínkách CHF. Experimentální data budou rovněž porovnávána s dosud provedenými nástriky na ATF. Vzorky nebudou analyzovány pouze z hlediska termohydrauliky, ale zejména z hlediska chování povrchu vzorků, což má velmi silnou vazbu na průběh varu na povrchu vzorků.

ATHOS: Advanced Nuclear Fuels – Material Research Area

Organizace poskytující zařízení: CEA France

Výzkumný tým:

Cílem je vývoj nových postupů k zajištění hermetičnosti SiCf/SiC kompozitů pro aplikaci nástřiků paliva. Framatome ve spolupráci s CEA vyvíjí keramickou kompozici SiCf/SiC nástřiků paliva s cílem výrazně zlepšit chování paliva při DBA a BDBA. Keramický nástřik vede k prodloužení odolnosti ATF od hodin až po dny.

Závěr

Po třetí výzvě v rámci OFFERR projektu bylo přijato celkem 32 projektů. Fast track projektů je 28 a Complex projektů je 11. V oblasti LWR Sustainability (dlouhodobá životnost) bylo přijato 8 projektů, v oblasti Advanced Fission Concepts (včetně SMR) 6 a v oblasti Advanced Nuclear Fuel rovněž 6 projektů. Další výzva pro podání projektů byla stanovena na 24. 9. 2024. Opět prioritními oblastmi jsou LWR Sustainability a AFR (Advanced Fission Reactors). V rámci mezinárodní spolupráce je navázána spolupráce s podobnými projekty v USA (NSUF) a UK (NNUF). Rovněž velmi důležitá spolupráce byla navázána s OECD/NEA LWR Sustainability Beyond 60 (vedený NRG) a rovněž s projektem OECD/NEA SMR NEXSHARE, vedený IAEA. OFFERR projekt má být ukončen v roce 2026. Všechny přijaté projekty budou postupně vyhodnoceny a bude zajištěno zveřejnění výsledků. Je velmi potěšující účast našich výzkumných organizací, která jistě bude pokračovat až do konce OFFERR projektu.

TESTOVÁNÍ A ANALÝZY BETONŮ A KAMENIVA Z HLEDISKA RADIAČNÍHO STÁRNUTÍ

TESTING AND ANALYSIS OF CONCRETE AND AGGREGATES FROM THE VIEWPOINT OF RADIATION AGING

Kamil Sobek ^{a)}, Alica Fedoriková ^{a)}, Jitka Klaisnerová ^{a)}, Patricie Halodová ^{a)}, Ondřej Srba ^{a)},
Kateřina Hrdličková ^{a), b)} a Petr Štemberk ^{a), b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt

Radiační stárnutí betonů je klíčovým problémem, který ovlivňuje dlouhodobou stabilitu a bezpečnost konstrukcí vystavených ionizujícímu záření, jako jsou jaderné elektrárny (JE), malé modulární reaktory (SMR) nebo úložiště radioaktivního odpadu. V Centru výzkumu Řež (CVŘ) se v rámci podpory prodloužování životnosti jaderných elektráren zaměřujeme na testování vzorků betonů biologického stínění a samotného kameniva s cílem lépe porozumět mechanismům radiačního poškození a identifikovat klíčové faktory ovlivňující tyto degradační procesy. V rámci tuzemských i mezinárodních projektů probíhá ozařování vzorků ve výzkumném reaktoru LVR-15 či gama ozařovně. Po ozaření jsou vzorky následně podrobeny mechanickému testování a detailním mikrostrukturním analýzám pro hodnocení vlivu neutronového a gama záření na jednotlivé složky betonu. Z dosavadních poznatků je patrné, že dominantní vliv na degradaci vzorků kameniva má ozařování rychlými neutrony o fluenci vyšší než 1×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV), které vyvolává mikrostrukturní a fázové změny přítomných minerálů. Příčinou změn mechanických vlastností betonů je synergie efektů neutronového záření na kamenivo a gama záření, způsobující radiolýzu vody v cementových pastách.

Abstract

Radiation ageing of concrete is a key issue that affects the long-term stability and safety of structures exposed to ionising radiation, such as nuclear power plants, small modular reactors (SMRs) or radioactive waste repositories. At the Research Centre Řež (CVŘ), as part of extending the life of nuclear power plants, we focus on testing concrete samples of biological shielding and the aggregate itself to understand the mechanisms of radiation damage and identify factors influencing these degradation processes. As part of Czech and international projects, samples are irradiated in the LVR-15 research reactor or Gama irradiation chamber.

Subsequently, the samples are subjected to mechanical testing and detailed microstructural analyses to evaluate the influence of neutron and gamma radiation on the individual components of the concrete. From the findings so far, the dominant influence of irradiation with fast neutrons with a fluence higher than 1×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) can be stated. Changes in the mechanical properties of concrete are caused not only by fast neutrons due to microstructural changes in the aggregate but also by gamma radiation causing radiolysis of water in cement pastes.

Úvod

Beton je nejrozšířenějším konstrukčním materiálem pro výstavbu radiačně odolných komponent v jaderných zařízeních, díky jeho nízkým výrobním nákladům a výborné funkčnosti pro stínění neutronů a gama záření. Hlavní betonové konstrukce nově budovaných jaderných elektráren (JE) jsou navrženy tak, aby vydržely nejméně 60 let provozu. Současné studie, které zahrnují poznatky z reálného provozu i z programů řízeného stárnutí betonů používaných v JE, však poukazují na fakt, že délka životnosti betonové konstrukce může být zásadně narušena negativními vlivy dlouhodobého působení radiace [1]. K identifikaci nejcitlivějších součástí

a klíčových degradačních faktorů, které mohou ovlivnit funkčnost tohoto stínění, jsou nezbytné rozsáhlé analytické a mechanické experimenty před a po ozáření. Naměřená data pak mohou sloužit jako vstupní sada pro simulační software, umožňující predikovat chování konstrukce při provozu až po dobu 100 let [2].

V případě radiačně odolného betonu může dlouhodobé vystavení vysokým úrovním záření způsobit změny v jeho mikrostruktuře a zapříčinit vznik trhlin. V důsledku těchto porušení dochází ke ztrátě mechanických vlastností (zejména k poklesu pevnosti v tlaku i tahu), což vede k předčasné degradaci betonové konstrukce. Nejvíce je působícím zářením ovlivněno kamenivo, jehož heterogenita a složitý chemismus přispívá k nerovnoměrným stínícím vlastnostem a rozdílnému objemovému nárůstu jednotlivých složek vlivem ozáření tzv. RIVE (radiation induced volumetric expansion). Neutronové záření interaguje s atomy ve struktuře minerálů, což způsobuje posuny atomů z jejich pozic v krystalové mřížce [2]. Tím vznikají defekty v mřížce jako jsou vakance (prázdná místa po atomech) nebo intersticiální atomy (atomy umístěné mezi pravidelnými pozicemi v mřížce). Tyto defekty se poté šíří napříč celou periodickou strukturou, což vytváří minerál semi-krystalinní až amorfni a zároveň může způsobit změnu mřížkových parametrů a celkové zvětšení objemu. Odolnost kameniva vůči ozáření závisí primárně na jeho minerálním složení. V kamenivu se mohou vyskytovat nejčastěji různé systémy silikátů, karbonátů, oxidů (vzácněji poté sulfidy, sulfáty, fosfáty), jejichž strukturní uspořádání a mezivazebné síly jsou pro radiační odolnost stěžejní [3].

Radiační poškození se v případě betonů projevuje i v hydratované cementové matrici, která je citlivá na gama záření. Pokud je ve stínících betonech přítomen materiál, jako například železná litina nebo výztuž ze železa, při vystavení neutronovému záření může vznikat sekundární gama záření. K tomuto jevu však může také docházet i v případě železem bohatého kameniva. V betonových konstrukcích, které obsahují takovýto materiál, je proto důležité tento proces sledovat, jelikož cementová pasta je tvořena zejména hydratovanými produkty cementu, jako jsou C-S-H fáze (hydrát křemičitanu vápenatého), portlandit (Ca(OH)_2) či další hydratované minerální fáze. Ionizace a tepelný účinek sekundárního gama záření mohou způsobit radiolýzu vázané vody a vysušování, uvolnění volných radikálů a vzniku peroxidu vodíku, které dále v materiálu reagují a tím degradují mikrostrukturu cementové pasty. Výsledkem je vznik mikrotrhlin, snížení pevnosti betonu a zhoršení jeho chemické stability. Pro ochranu betonových konstrukcí před těmito nežádoucími účinky je nutné využívat k výstavbě vhodné materiály, zahrnout preventivní opatření a zavést pravidelné monitorování stávajících konstrukcí [4].

Metodika

Studium vybraných betonů a kameniva před a po ozáření vyžaduje komplexní metodiku, která zahrnuje různé experimentální postupy, analytické metody a zkoušky, které umožňují charakterizaci fyzikálních, chemických a mechanických vlastností betonu. Tato metodika je klíčová pro pochopení vlivu ionizujícího záření na strukturu, vlastnosti a trvanlivost betonu. Po ozáření je nezbytné zopakovat experimenty, které byly provedeny před ozářením, aby bylo možné porovnat změny ve vlastnostech betonu způsobené ozářením.



Obr. 1: Vzorky tří typů kameniva vybrané k umístění do ozařovací sondy spolu s kovovým pouzdrem (vpravo) pro umístění řezu určeného k práškové rentgenové difrakci

K experimentům se využívají válečky kameniva o rozměrech 1×1 cm (Obr. 1) a betonové válce o rozměrech 4×6 cm. I když tyto rozměry vzorků neumožňují měření dle příslušných norem, jsou zvoleny s ohledem na geometrii reaktorové sondy umístěné v reaktoru LVR-15.

Pro stanovení objemových změn se využívá kombinace měření rozměrů a hustoty materiálu, které lze mezi sebou matematicky porovnat a ověřit za použití:

- He-pyknometrie – měření hustoty za pomoci He (penetrace pórů plynem),
- H₂O-pyknometrie – měření hustoty za pomoci H₂O (penetrace pórů kapalinou),
- 3D optické a dotykové měření (Vertex) – měření výšek a obvodů ve specifických bodech tělesa a snímkování povrchových nedokonalostí.

Pro mikrostrukturní charakterizaci vybraných vzorků je nejprve provedena metalografická příprava, tj. zalití tenkých plátků materiálu do čiré epoxidové pryskyřice a následné broušení a leštění povrchu vzorku pomocí brusných papírů a diamantových past. Finální krok leštění zajišťuje potřebný dokonale hladký a rovný povrch vzorků. Pro analýzy skenovací elektronovou mikroskopií (SEM) je potřeba na povrch vzorků deponovat tenkou vodivou uhlíkovou vrstvu. V případě rentgenové difrakce je vzorek nutné namlít na prášek. Přípravu ozářených vzorků je nutné provádět ve stíněných hermeticky uzavřených boxech, jelikož se v průběhu procesu přípravy vzorků uvolňuje velké množství prachových radioaktivních částic (viz obr. 2). Pro nakládání s radioaktivním materiálem je speciálně určená a upravená infrastruktura, která se nachází v kontrolovaném pásmu. Experimenty jako takové probíhají v hermeticky uzavřených komorách, kde lze pracovat se vzorky s aktivitou až do 300 TBq ekvivalentu ⁶⁰Co.



Obr. 2: Rukavicový box infrastruktury CICRR určený pro práci s ozářenými vzorky. Slouží jako přípravná pro vzorky určené k analýzám na SEM-EDS a XRD

Ozářené i neozářené vzorky můžeme analyzovat pomocí:

- Světelné optické mikroskopie (LOM) – předběžná charakterizace vzorků, detekce zájmových oblastí, identifikace opticky rozdílných prostředí.
- Ramanovy spektroskopie – identifikace jednotlivých fází, strukturních změn vlivem chemismu a radiačních procesů, detekce přítomnosti vody ve struktuře.
- Elektronové mikroskopie a mikroanalýzy (SEM-EDS) – určení fázového zastoupení (modální složení), zobrazení chemických distribučních map (EDS mapování velkých oblastí) detekce trhlin nebo vzniku sekundárních minerálů, bodová a liniová chemická analýza zájmových minerálů.

Rentgenové difrakční analýzy (XRD) – identifikace fází, kvantitativní zastoupení fází, změny mřížkových parametrů, stanovení amorfního podílu, V případě potřeby lze použít navíc speciální doplňkové zobrazovací metody jako rentgenovou výpočetní tomografii (CT), gama tomografii, či HPGe gama detektor pro identifikaci vnitřní stavby, míry aktivace či stínících vlastností bez nutnosti destrukce vzorku.

Mechanické testování betonů a kameniva před a po ozáření umožňuje stanovení pevnosti vzorků v tlaku. Zkoušky umožňují vyhodnotit, do jaké míry záření ovlivnilo celkovou únosnost betonu. Zkouška modulu pružnosti po ozáření může poodhalit, zda došlo ke změnám v pružnosti a odolnosti betonu vůči deformacím.

Výsledky

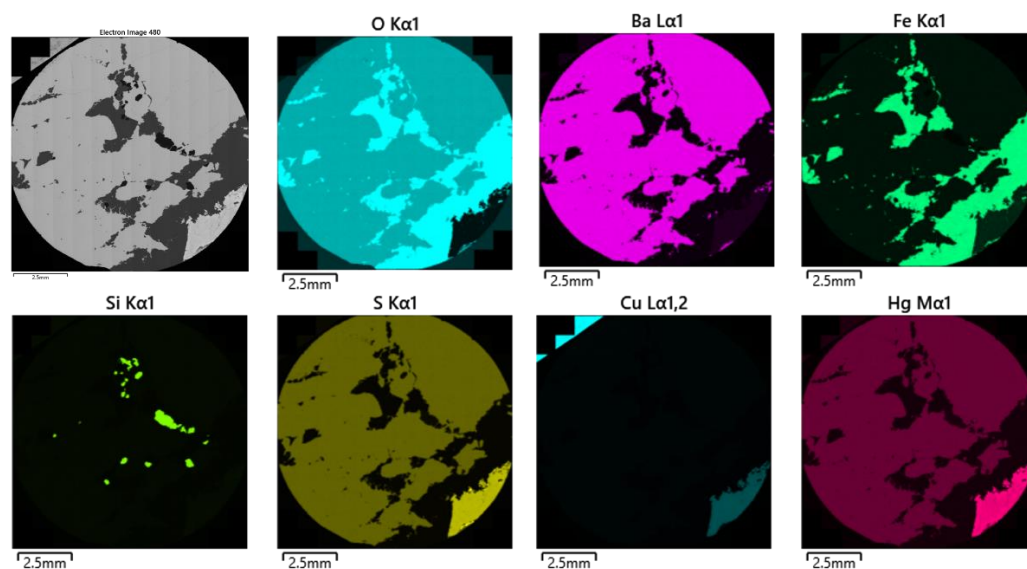
Mezinárodní výzkum v oblasti radiačního stárnutí betonů a kameniva přinesl řadu důležitých poznatků, které rozšířily poznání příčin a míry degradace těchto materiálů při radiační zátěži [3],[4]. Přesto pro tyto konstrukční materiály platí, že složení cementu a použité kamenivo je unikátní pro danou zemi a je vázáno na svůj regionální původ. Z tohoto důvodu lze výsledky zahraničních studií mezi sebou srovnávat jen do určité míry a je zapotřebí každý beton nebo kamenivo posuzovat a zkoumat zvlášť, s ohledem na jeho specifika. Vzhledem k náročným požadavkům na infrastrukturu pro ozařování i pro manipulaci a analýzu ozářených vzorků, je stále velké množství dat a informací nedostupných.

Z dosavadních poznatků je patrné, že studium dlouhodobých efektů radiačního stárnutí na stávající betonové konstrukce a kamenivo je naprosto stěžejní, zejména z pohledu posuzování bezpečnosti jaderných zařízení při prodlužování jejich životnosti. Díky ozařovacím experimen-

tům je zároveň možné vyvinout nové směsi, nahradit současně používané materiály a kame-nivo, s cílem zlepšit vlastnosti a radiační odolnost betonu. Význam těchto studií lze demonstrovat na případu vlivu neutronového záření na strukturu křemene (SiO_2), který je hojně zastoupen v magmatických a sedimentárních horninách. V experimentálním prostředí s vysokými úrovněmi neutronového záření (až $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$) podléhá křemen extrémnímu radiač-nímu stárnutí a struktura se mění z krystalické na amorfni. Vlivem ozáření může dojít k nárůstu jeho objemu až o 25 % [2]. Použití kameniva s vysokým obsahem křemene (např. granit, kvarcit, ortorula, písky) bude generovat značné množství trhlin a vnitřních poruch, které způ-sobí oslabení betonové konstrukce. Nabízí se tak použití kameniva bazického až ultrabazického složení, ve kterém je šance na výskyt křemene minimální. Ne vždy se však lze jeho přítomnosti zcela vyvarovat.

Stínící betony obsahují kromě běžného kameniva také speciální těžké kamenivo s vysokou hustotou, jako je baryt, magnetit, železná ruda nebo olovo. Díky tomu je výsledný beton mnohem těžší (až kolem 3850 kg/m^3), což zvyšuje jeho schopnost pohlcovat záření. V případě ba-rytu (BaSO_4) se jedná o jeden z nejtěžších minerálů, který není kovový a vyznačuje se výbornou chemickou stabilitou. Pro stínící beton tuzemských JE se využíval baryt z lokality Rudňany (Slovensko).

Pro účely pre-charakterizace (testování a analýzy referenčních neozářených vzorků) byl ana-lyzován vzorek barytu pocházející z již nečinného dolu ve slovenských Rudňanech, který je tvořen směsí minerálů s různým chemickým složením. Mléčně zbarvený křemen lze opticky snadno zaměnit za čirý až mléčně zbarvený baryt – podobně jej lze zaměnit za kalcit (CaCO_3), který může být také přítomný. Dále se zde vyskytuje rezavě zbarvený karbonát siderit (FeCO_3) a akcesorické opakní rudní minerály (tetraedrit, pyrit, chalkopyrit). Díky velkoplošnému ma-pování za pomoci SEM-EDS (Obr. 3) lze pozorovat rozložení hlavních přítomných chemických prvků ve vzorku a spolehlivě odlišit přítomné minerální fáze. Detekované drobné inkluze kře-mene mohou v barytu představovat značné riziko vzniku trhlin, i když je baryt chemicky sta-bilní a radiačně odolný materiál. Stejně riziková může být i přítomnost tetraedritu s významným podílem rtuti a mědi. Přítomnost rudních akcesorických minerálů ve vzorcích je důležité zkou-mat a identifikovat i z toho důvodu, že povede k vyšší aktivaci materiálu při ozařování.



Obr. 3: SEM-BSE snímek (vlevo nahoře, zobrazení ve zpětně odražených elektronech – che-mický kontrast) a SEM-EDS velkoplošné mapy řezu válečku barytu z Rudňan s analyzova-nými prvky představujícími rozdílné minerální fáze, kde Ba = baryt, Fe = siderit, Si = křemen a Hg a Cu = tetraedrit

Díky pre-charakterizaci lze získat nezbytné údaje o materiálech ještě před jejich ozáření. Provedené analýzy umožňují porozumět původní struktuře a vlastnostem kameniva a betonu, což je nezbytné pro správné hodnocení změn po ozáření. Výsledky lze navíc použít pro identifikování problematických komponent a predikci jejich degradace vlivem radiace.

Závěr

Speciálně navržené a realizované laboratorní a mechanické testy betonů a kameniva před a po ozáření umožňují přesně kvantifikovat dopady záření na tyto materiály a poskytují důležité informace pro pochopení radiačního stárnutí betonů používaných v jaderných zařízeních. Na základě znalostí o degradaci betonových struktur lze navrhnout klíčové kroky a opatření pro zajištění jejich dlouhodobé bezpečnosti a spolehlivosti. Získané poznatky jsou zásadní pro návrh nových betonových směsí s vyšší radiační odolností, pro posouzení prodloužení životnosti stávajících konstrukcí či jejich následné vyřazování po ukončení provozu JE. Výzkum v této oblasti je nezbytný pro další rozvoj bezpečných a udržitelných technologií v oblasti jaderné energetiky.

Poděkování

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

Literatura

- [1] BRUCK, P.M., ESSELMAN, T.C., ELAIDI, B.M., WALL, J.J., WONG, E.L. Structural assessment of radiation damage in light water power reactor concrete biological shield walls. *Nuclear Engineering and Design*, August 2019, vol. 350, p. 9-20, doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.04.027
- [2] KHMUROVSKA, Yuliia, ŠTEMBERK, Petr. Catalogue of radiation-induced damage of rock aggregates identified by RBSM analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, June 2021, vol. 19, no. 6, p. 668-686, doi: 10.3151/jact.19.668
- [3] LE PAPE, Y., SANAHUJA, J., ALSAID, M.H.F. Correction to: Irradiation-induced damage in concrete-forming aggregates: revisiting literature data through micromechanics. *Materials and Structures*, March 2021, vol. 54, no. 75, doi: 10.1617/s11527-021-01655-4
- [4] MARUYAMA, I., KONTANI, O., TAKIZAWA, M., SAWADA, S., ISHIKAWAO, S., YASUKOUCHI, J., OSAMU, S., ETOH, J., IGARI, T. Development of soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-ray irradiation. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2017, vol. 15, no. 9, p. 440-523, doi: 10.3151/jact.15.440
- [5] SILVA, C.M., ROSSEEL, T.M., KIRKEGAARD, M.C. Radiation-induced changes in quartz, a mineral analogue of nuclear power plant concrete aggregates. *Inorganic Chemistry*, 2018, vol. 57, no. 6, p. 3329-3338, doi: 10.1021/acs.inorgchem.8b00096

VÝVOJ POKROČILÝCH METOD HODNOCENÍ STAVU KOMPONENT

DEVELOPMENT OF METHODS OF ADVANCED COMPONENT CONDITION ASSESSMENT

Jaroslav Brom, Jana Veselá, Petr Živný a Pavel Zahradka

Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ)

Abstrakt

V článku jsou popsány cíle a stávající stav vývoje metod pro diagnostiku stavu konstrukčních prvků energetických zařízení, a to pro tři oblasti:

1. Detekce a kvantifikace creepového poškození materiálu pomocí moderních ultrazvukových technik, kdy se předpokládá vývoj a výroba zkušebních těles s různými stádii poškození.
2. Online diagnostický systém pro měření elektrického potenciálového napětí na částech komponent se zaměřením na detekci vzniku a růstu.
3. Metoda oboustranné 3D laserové profilometrie vnější i vnitřní strany komponent pro potrubní systémy na jaderných elektrárnách.

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

Abstract

The article describes the goals and the current state of development of methods for diagnosing the condition of structural elements of energy equipment in three areas:

1. Detection and quantification of material creep damage using modern ultrasonic techniques, where the development and production of test specimens with different stages of damage is assumed.
2. Online diagnostic system for measuring the electric potential voltage on component parts with a focus on the detection of formation and growth.
3. Method of two-sided 3D laser profilometry of the outer and inner sides of components for piping systems at nuclear power plants.

The presented work has been realized within Institutional Support by Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

1. Úvod

CVŘ se v rámci dlouhodobé koncepce rozvoje společnosti pro roky 2023 až 2027 rovněž zaměřuje na vývoj v oblasti metod nedestruktivního zkoušení pro detekci provozních vad a monitorování jejich rozvoje s cílem zvyšovat spolehlivost provozu jaderných elektráren včasným odhalením rizika poruchového stavu a tím zabránění neočekávaných výpadků výroby.

První oblastí vývoje je vývoj metody nedestruktivního zkoušení pro detekci creepového poškození materiálu, který proběhne na měrkách a zkušebních tělesech s různou tloušťkou. Zkušební tělesa budou reprezentovat různá stadia poškození materiálů pro ověření použitelnosti UT metod. Výstupem bude metodika zkoušení využitelná při provozních kontrolách.

Další vývoj je zaměřen na vývoj online diagnostického systému pro měření elektrického potenciálového napětí na povrchu komponent. V rámci jeho testování budou realizována ověřovací měření na zkušebních tělesech s různým druhem rozvoje poškození typu trhliny za účelem jeho detekce. Součástí měření novým zařízením bude nejen přenos dat do online úložiště, ale také automatizované zpracování naměřených dat.

Jako poslední bude vyvinut a otestován systém oboustranné laserové 3D profilometrie ve formě funkčního prototypu zařízení pro skenování materiálu z vnější i vnitřní strany povrchu. Bude stanovena a ověřena nejistota měření 3D profilů. Zařízení by mělo být využitelné všude, kde je nutné znát komplexní stav 3D profilů např. parovodů, potrubních tras, tlakových nádob.

2. Měření creepového poškození

V rámci vývoje metody nedestruktivního zkoušení pro detekci provozních vad budou vyrobeny měrky a zkušební tělesa pro různé tloušťky a materiály využívané v nových energetických zdrojích. Zkušební tělesa budou reprezentovat různá stadia creepového poškození materiálů pro ověření použitelnosti navržených nedestruktivních ultrazvukových technik. Výstupem bude metodika zkoušení využitelná při provozních kontrolách.

2.1 Požadavky na měrky

Na základě EPRI zpráv jsou k výrobě navrženy 3 měrky pro ultrazvukové zkoušení.

2.2 Požadavky na zkušební tělesa

Zkušební tělesa jsou navržena s ohledem na znalosti převzaté z EPRI. Jedná se o tělesa vyrobená svařováním – viz obr. 1. Postup svařování a jeho kvalifikace je na straně realizátora svařování, který má celý proces kvalifikovaný v rámci ČEZ, a. s.



Obr. 1: Zkušební těleso po creepovém zatěžování 2000 h

2.3 Popis zkušebního zařízení

Pro realizaci creepových zkoušek je využito zařízení VZÚ Plzeň se základními parametry: délka pece 400 mm, průměr pece 70 mm a aktivní zóna 50 mm.

2.4 Popis měřícího zařízení pro UT

Pro zkoušku ultrazvukem technikou PAUT je využit laboratorní přístroj Dynaray 128/128 PR, případně ruční PA přístroj.

Vazební médium voda a PA sonda o frekvenci min 5 a maximálně 10 MHz s min počtem elementů 32.

2.5 Postup zkoušek

Volba parametrů zkoušení byla zvolena na základě výsledků EPRI a praktických zkušeností VZÚ Plzeň.

Tělesa o rozměru 210×15×25 jsou v místě svaru a tepelně ovlivněné zóny ohřáta na teplotu 650 °C a zatěžována tahem 60 MPa po dobu 500 hodin, přerušení zkoušky pro PAUT a pokračování dalšími 500 hodinami. Celková doba přerušované creepové zkoušky bude 3000 hodin.

Celkem bude provedeno 1+6 měření PAUT s cílem zachytit rozvoj creepového poškození svarového spoje. Cílem je získat ZT s definovaným creepovým poškozením, které bude možné minimálně u jednoho ZT ověřit metalograficky tzn. destruktivně prokázat přítomnost creepového poškození a určit jeho stádium.

Na zkušebních tělesech bude prováděna přerušovaná creepová zkouška s cílem nedosáhnout porušení zkušebních těles a měření PAUT a tvrdosti v následujících krocích:

1. Vstupní měření PAUT svarového spoje a měření tvrdosti s cílem získání průběhu tvrdosti přes svar.
2. Creepové zatěžování – po 500 hodinách / PAUT, po 1000 hodinách / PAUT, po 1500 hodinách / PAUT, po 2000 hodinách / PAUT, po 2500 hodinách / PAUT, po 3000 hodinách / PAUT.
3. Měření tvrdosti po 3000 hodinách s cílem získání průběhu tvrdosti přes svar pro srovnání s bodem 2.

Každé měření PAUT, případně dalšími novými technikami zkoušení (TFM, PCI apod). bude vyhodnoceno v SW Ultravision 3, výsledky zaznamenány do protokolu a tyto vzájemně porovnávány. Creepová zkouška bude pokračovat vždy až po vyhodnocení předchozího měření PAUT, a to z důvodu včasného zachycení creepového poškození, aby nedošlo k destrukci ZT.

V případě, že zvolené parametry zatěžování při creepové zkoušce nepovedou k rozvoji porušení, budou další ZT podrobena zkoušce s delším časem.

V případě ověření použitelnosti zvolených měřících technik pro měření rozvoje creepu, bude vytvořen postup jejich certifikace.

3. Měření elektrického potenciálového napětí

V návaznosti na dlouholeté zkušenosti s identifikací vad pomocí potenciálové metody na klasických elektrárnách, je vyvíjeno nové diagnostické zařízení. Stávající mobilní monitorovací systém slouží k identifikaci vzniku případně sledování růstu vad a umožňuje jejich lokalizaci i za vysoké teploty a tlaku média.

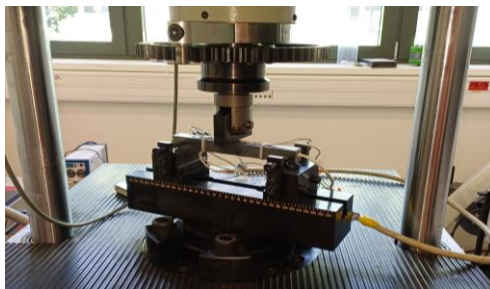
Vývoj je rozdělen na tři oblasti. První oblast řeší vývoj nové mobilní měřicí jednotky se zvýšeným rozsahem a citlivostí oproti stávajícímu zařízení včetně základních algoritmů pro zpracování naměřených dat. Tento vývoj probíhá v rámci VaV projektu ČEZ, a.s. Druhá oblast řeší vývoj on-line diagnostického zařízení, které bude fixně nainstalováno na lokalitě v blízkosti monitorované technologie. Sběr dat bude probíhat vzdáleně a bude zajištěn jejich následný post processing. V třetí oblasti jsou realizovány experimentální zkoušky, tvorba výpočtů, simulace a modely pro účely vývoje pokročilých algoritmů pro zpracování naměřených dat. Druhá a třetí oblast jsou řešeny v rámci interního projektu CVŘ.

3.1 Zkušební tělesa a testování

Pro testy první verze navrhovaného zařízení a naladění výpočetního modelu budou použita zkušební tělesa daných rozměrů – viz obr. 2 vytvořená v CVŘ. Měření na těchto tělesech budou probíhat při rostoucí vadě za studena (teplota okolí) i tepla (cca 500 °C – tělesa budou umístěna v peci).

V následující fázi vývoje a následném testování zařízení budou využívána zkušební tělesa, která byla demontována z provozu energetických bloků společnosti ČEZ, a.s. viz příklad na obr. 3. Tato tělesa budou měřena za studeného stavu, kdy jejich teplota bude odpovídat teplotě okolí (+20 °C).

Do těles budou vytvářeny umělé vady pro zjištění funkčnosti detekce trhliny navrhovaného zkušebního zařízení.



Obr. 2: Zkoušky citlivosti potenciálové metody na náhradním tělese



Obr. 3: Zkušební těleso – T kus KR 375/220

3.2 Simulace těles – výpočetní model

Pro ověření správnosti návrhu zkušebního zařízení bude navržen výpočetní model, dle kterého půjde ověřit naměřené hodnoty na jednotlivých zkušebních tělesech.

3.3 Vývoj prototypu on-line zařízení a vyhodnocovacího SW

Při závěrečném testování vyvinutého zařízení budou využita vytipovaná místa energetických bloků za provozního namáhání.

4. Oboustranná 3D laserová profilometrie

Bude vyvinut a otestován systém oboustranné 3D profilometrie ve formě funkčního prototypu zařízení pro skenování materiálu z vnější i vnitřní strany povrchu. Bude stanovena a ověřena nejistota měření 3D profilů. Zařízení by mělo být využitelné všude, kde je nutné znát kompletní stav např. parovodů, potrubních tras, tlakových nádob. K řešení jsou dva základní problémy: měření tloušťky materiálu bez vazebního prostředku pomocí klasických UT nebo EMAT sond a dosažení dostatečné rychlosti měření celého vnitřního povrchu. Cílem je dosáhnout rychlosti snímání minimálně 10 bodů za sekundu v ploše o šířce alespoň 5 cm. Přesnost a rychlost skenování bude vycházet z přesnosti měření hloubek pomocí klasických UZ, EMAT nebo PAUT sond.

V současné době se pro hodnocení stavu opotřebení vnitřního povrchu potrubí využívá pouze bodové ultrazvukové měření. To nám dává pouze omezenou informaci o stavu vnitřního povrchu vlivem eroze či koroze a deformace působením creepu. Při komplexním měření celého vnitřního povrchu, které umožňuje toto zařízení získáme úplnou představu o stavu poškození v celém objemu materiálu. Měřicí zařízení by tedy mělo splňovat základní parametry týkající se přesnosti a rychlosti měření, které jsou zásadní pro použitelnost v provozu a které budou primárně vycházet ze zvolené metody měření. Cílem je sestavit zařízení s rychlostí měření min. 10 bodů za sekundu s přesností minimálně 0,1 mm. Součástí vývoje bude také ověření nejistot měření vycházejících ze všech dílčích kroků snímání povrchu, které ovlivňují celkovou přesnost finálního STL modelu tělesa.

Poděkování

Presentované programy jsou řešeny v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

TEST ŠROUBŮ PŘI TĚŽKÝCH ZATÍŽENÍCH – MAZÁNÍ ŠROUBŮ

SCREW TEST UNDER HEAVY LOADS – SCREW LUBRICATION

Andreas Wessely ^{a)} a Zdeněk Nacházel ^{b)}

^{a)} Wessely GmbH

^{b)} Nacházel, s.r.o.

Abstrakt

Strojních součástí – šroubových spojů – je ve světě denně montováno miliony kusů, a přestože jsou k dispozici normy a tím možnost přesných teoretických výpočtů, dochází stále v praktickém použití k mnoha problémům.

Abstract

Millions of machine components – screw joints - are assembled every day in the world, and although standards are available and thus the possibility of accurate theoretical calculations, many problems still occur in practical use.

1. Úvod

Strojních součástí – šroubových spojů – je ve světě denně montováno miliony kusů, a přestože jsou k dispozici normy a tím možnost přesných teoretických výpočtů, dochází stále v praktickém použití k mnoha problémům.

Při šroubování (utahování)

Při vypočtených nebo předepsaných utahovacích momentech je vlivem rozptylu hodnot vzájemného tření šroubů dosahováno různých napínacích sil. Následně napínací síly nejsou kontrolovatelné a s tím je spojené i nerovnoměrné předpětí (např.: příruby, kryty, tělesa, ...).

Při povolování u šroubů

V oblasti vysokých teplot nebo v oblasti kolísání teploty se často při povolování spojů setkáváme se značnými problémy. Nevhodné pasty mohou při vysokých teplotách způsobit v materiálu šroubu metalurgické změny a tím značně zvýšit povolovací moment. U nevhodných past při zvýšených teplotách nosné médium často shoří a zanechá abrazivní a hydrokopické zbytky, které při kolísání teplot mohou přijímat vlhkost a způsobují korozi na materiálu šroubů. Takovéto šrouby jsou často už nepovolitelné bez jejich poškození.

2. Metody

2.1 Předmět

Zkouška speciálních maziv na jejich výkon při vysokých zatíženích a přezkoušení přenosu těchto výsledků na běžné, v praxi používané, výpočtové metody.

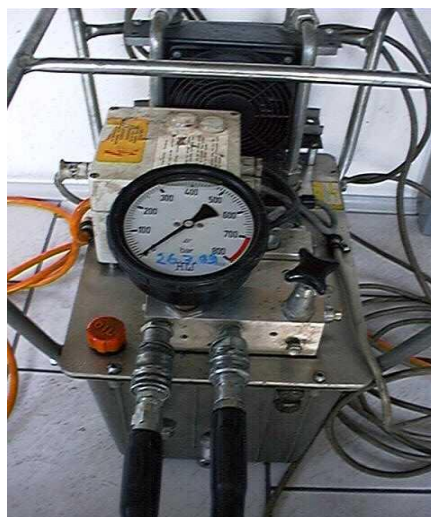
2.2 Průběh zkoušky

Pro šroubové zkoušky byl použit hydraulický utahovák od firmy Hytorc (obr. 1). Tento utahovák byl zvolen proto, že garantuje velmi přesné a vysoké utahovací momenty a jeho konstrukce je příjemná pro ruční zacházení.

Potřebný hydraulický tlak byl získáván v agregátu AEK 12 380 (obr. 2), kde byl pomocí regulačního ventilu přesně nastaven tlak 260 bar.



Obr. 1: HY-4XLCT



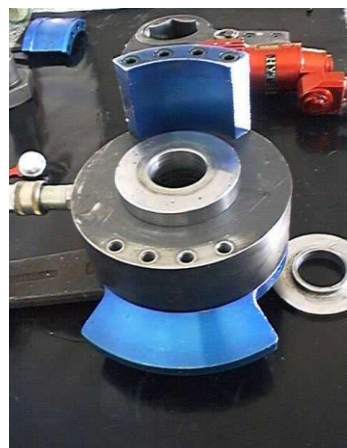
Obr. 2: AEK 12 380

Dle tabulek k přístroji Hytorc HY-4XLCT odpovídá tomuto tlaku oleje utahovací moment 2032 Nm.

Jako vlastní zkušební jednotka pro odečítání a měření síly byla použita jednotka Loadcell LC-150 (obr. 3 a obr. 4) od firmy Hytorc. Jednotka Hycheck TDS 2000 (obr. 5) dovoluje odečítat dosaženou napínací sílu přímo v kN.



Obr. 3: LC 150



Obr. 4: LC 150

Testovány byly šrouby se šestihrannou hlavou dle DIN 931 (DIN EN 24014) v rozměrech M42×140 mm pevnostní třídy 8.8 (obr. 6) s k tomu příslušícími maticemi a podložkami.



Obr. 5: TDS 2000



Obr. 6: Šrouby, podložky a šestihranné matice

2.3. Přípravné kroky

Šrouby, podložky a matice byly očištěny a pro zkoušení připraveny (ošetřeny) různými kluznými povlaky (obr. 7 a obr. 8), různými šroubovými a montážními pastami. Jeden šroub nebyl ošetřen, resp. byl použit ve stavu dodání.

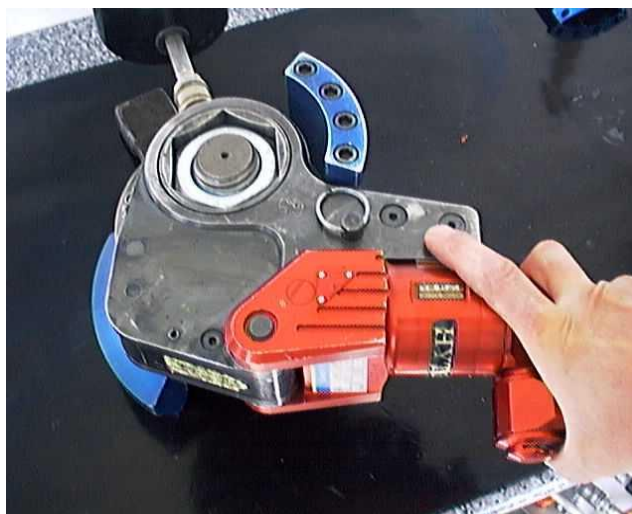


Obr. 7: Chemická předúprava



Obr. 8: Potažení závitu kluzným lakem

Zkoušené šrouby byly vloženy do tlakového přípravku Loadcell a hlava šroubu zajištěna proti protáčení korunkovým klíčem (65 mm). Potom byly podložky a matice ručně našroubovány až na dosedací plochy (obr. 3). Dále byl nasazen hydraulický klíč a zkušební postup pro každý šroub vícekrát (6x) zopakován (obr. 9).



Obr. 9: Provedení zkoušky

3. Výsledky

Tab. 1: Zkoušeny byly následující ošetření a maziva:

A	čistý šroub, čistá podložka, pozinkovaná matice
B	na vzduchu schnoucí kluzný lak
C	vypalovací MoS ₂ kluzný lak
D	MoS ₂ montážní pasta
E	vysokoteplotní pasta na šrouby
F	univerzální mazivo

Tab. 2: S utahovacím momentem 2032 Nm byly dosaženy následující napínací síly:

Napínací síla v kN												
Zkouška	A	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	E ₁	E ₂	E ₃	F
1	245	670	680	635	530	480	410	400	280	285	275	232
2	207	680	656	610	470	460	420	420	260	270	280	185
3	196	*)	650	587	446	470	427	440	270	260	300	212
4	175		642	585	451	460	446	442	272	250	300	169
5	140		642	585	460	450	465	440	265	235	290	200
6	**)		660	552	455	440	465	430	250	235	330	124

Pozn. *) zkoušky byly přerušeny (nebezpečí překročení pevnosti materiálu, **) zadření

Tab. 3.: Z naměřených hodnot utahování jsou určeny následující hodnoty rozptylu

Rozptyl [%]											
A	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	E ₁	E ₂	E ₃	F
42,9	1,47	5,59	13,1	15,9	8,33	11,8	9,50	10,7	17,5	16,7	46,5

Tab. 4: Následující střední hodnoty koeficientu tření mohou být přiřazeny jednotlivým zkouškám

μ - střední hodnota											
A	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	E ₁	E ₂	E ₃	F
0,207	0,046	0,048	0,055	0,074	0,075	0,079	0,082	0,170	0,147	0,125	0,215

4. Diskuse

Zhodnocení

Předložené výsledky testů dokumentují, že jednotlivé systémy potahování, past, resp. tukové systémy dosahují charakteristických a s předešlými zkouškami srovnatelných výsledků.

Zhodnocení jednotlivých systémů

zkouška s čistým a nenamazaným šroubem byla přerušena. Extrémně vysoký rozptyl při dosažených silách vylučuje jeho praktické nasazení. K povolení pevně zakousnutého šroubu bylo nutné použít mnohonásobně zvýšeného momentu. U zkoušeného šroubu došlo na povrchu závitu i dosedacích plochách k přenosu materiálu a význačným rýhám (zaděrům) na povrchu.

U na vzduch schnoucího kluzného laku (zkouška B) bylo na základě jeho nízkých hodnot koeficientu tření dosaženo vysoké napínací síly při nízkém rozptylu. Tyto hodnoty bylo možné dosáhnout prostřednictvím mechanické a chemické předúpravy povrchu šroubu a použitím vysokovýkonného kluzného laku. Hodnoty rozptylu pod 10 % (5,58 %) jsou spolehlivé a vynikající hodnoty pro výpočty šroubů, přičemž skutečný rozptyl hodnot tření leží níže než naměřené hodnoty, neboť zjištěné hodnoty rozptylu zde ještě obsahují nepřesnosti na dosedacích plochách (matice/podložka) a poškození závitu.

Systém kluzného laku vytvrzovaného v peci (zkouška C) a tím odolného olejům a tukům rovněž vykazuje velmi vysoké napínací síly při nepatrném rozptylu.

Pasty (zkouška D a C) dávají v závislosti na použitém tuhém mazivu stejné, avšak relativně nízké napínací síly. Bylo dále zjištěno, že při ne zcela optimálním očištění, resp. nedostatečném (nestejném) nanesení pasty dojde k vysokému zvýšení hodnot rozptylu.

Mazání pouze „tukem“ za pomoci univerzálního plastického maziva nepřináší žádné použitelné hodnoty (zkouška F).

5. Závěr

V úvodu nastíněná problematika při šroubových spojích je řešitelná při pečlivě vybrané předúpravě a ošetření šroubů, matic a podložek.

Požadovaný vztah „utahovací moment a napínací síla“ je při těchto hodnotách a rozptylech velmi dobře zjištěný při nasazení technologie utahování, jako mazání a technika šroubování.

Prostřednictvím definovaných, konstantních a počítatelných hodnot tření je možné určení dosažených napínacích sil i v praxi.

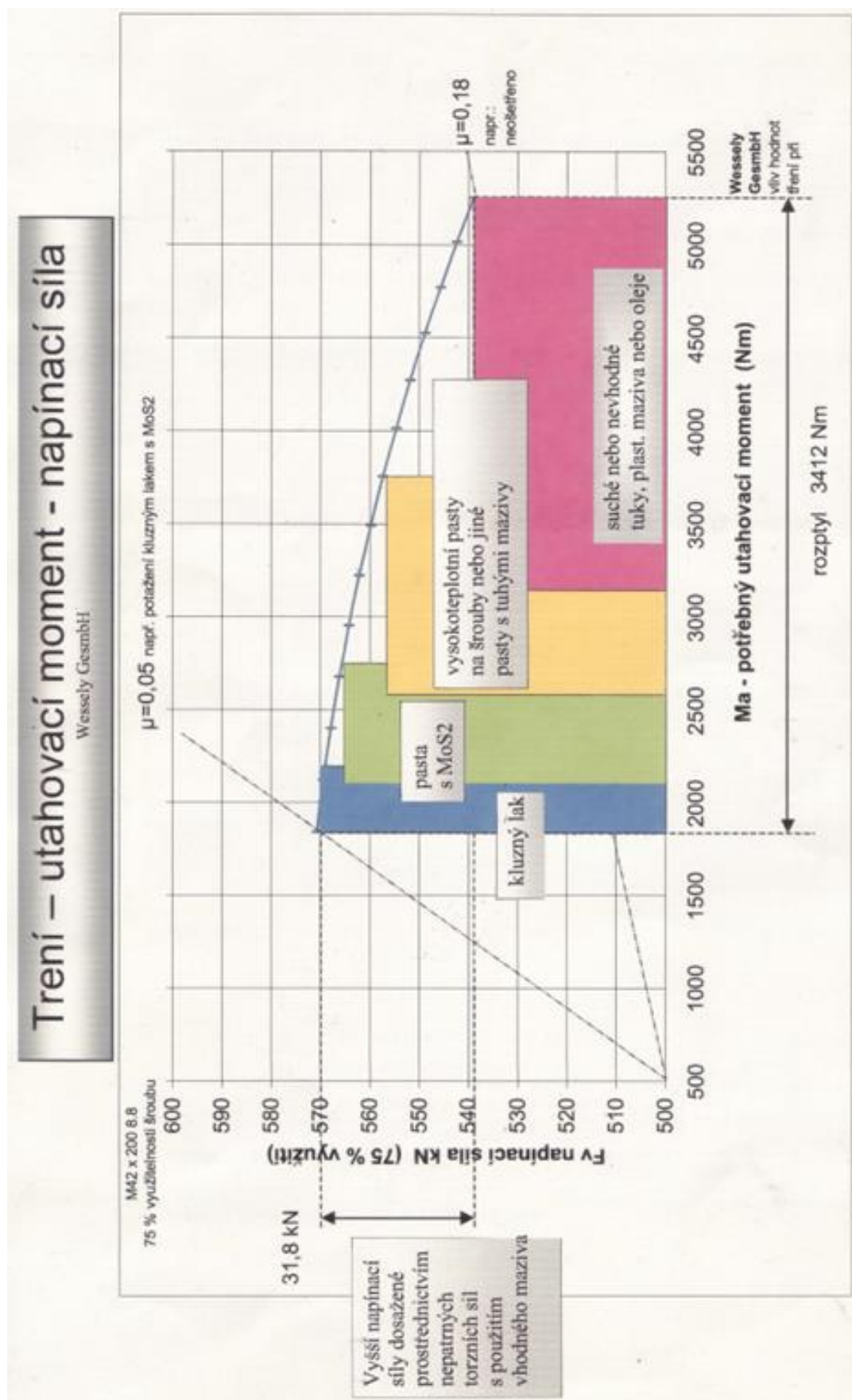
Použitím kluzných laků je dodatečně lépe využitelný prostor použití šroubů, kde z důvodů snížení třecích odporů v závitu dochází také ke snížení torzního namáhání a tím je možné podstatné zvýšení napínací síly (viz obr. 10). Z těchto důvodů je potom možné použít levnější materiál při výrobě šroubů anebo šrouby menších rozměrů pro stejné případy použití.

Kontakt

GLEIT- μ [®] zastoupení pro ČR a SR

Nacházel, s.r.o., Hrnčířská 463, 252 42 Zdiměřice, www.nachazel.cz





Obr. 10: Tření – utahovací moment – napínací síla

ECOL LUBRICATION MANAGEMENT – OUTSOURCING MAZÁNÍ STROJŮ A ZAŘÍZENÍ V SOULADU S NOVÝM STANDARDEM ICML 55.1

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

Tomáš Klíma

Ecol Industrial s.r.o.

Abstrakt



Obr. 1: Soubor oblastí patřících k managementu mazání dle normy ICML 55.1

LUBRICATION MANAGEMENT je důležitou součástí správy majetku a celého Asset Managementu v průmyslovém podniku, kde vhodným programem mazání ovlivníme výslednou spolehlivost podniku.

Mazání a mazivo je klíčovým konstrukčním prvkem každého stroje a dílčích mazacích uzlů. Vhodným uspořádáním celého procesu a programu mazání ovlivníme výsledný výkon strojů a jejich spolehlivost a životnost. Pro pochopení, co proces mazání strojů zahrnuje, nám poslouží nově vydaná norma ICML 55.1. V této normě je uvedeno 12 dílčích kapitol, které do procesu mazání patří a ovlivňují celý výsledek této komplexní činnosti.

Je nesprávné na mazání nahlížet jen jako na činnost doplnění maziva/oleje, udržení maziva v optimální kondici a jeho diagnostiku nebo pečlivý výběr typu oleje a požadovaných vlastností.

Nejlepší praktiky v této branži dnes pojmenovává výše uvedené norma a uvádí tyto činnosti do souvislostí. Za vznik tohoto standartu vděčíme široké skupině profesionálů z oblasti tribotechniky, jenž sdružuje asociace ICML (International Council for Machinery Lubrication).

V tomto příspěvku bude představen koncept outsourcingu mazání, který se opírá o 30 let zkušeností profesionálů Ecol v této branži. Zejména z oblasti energetiky, petrochemie a automotive.

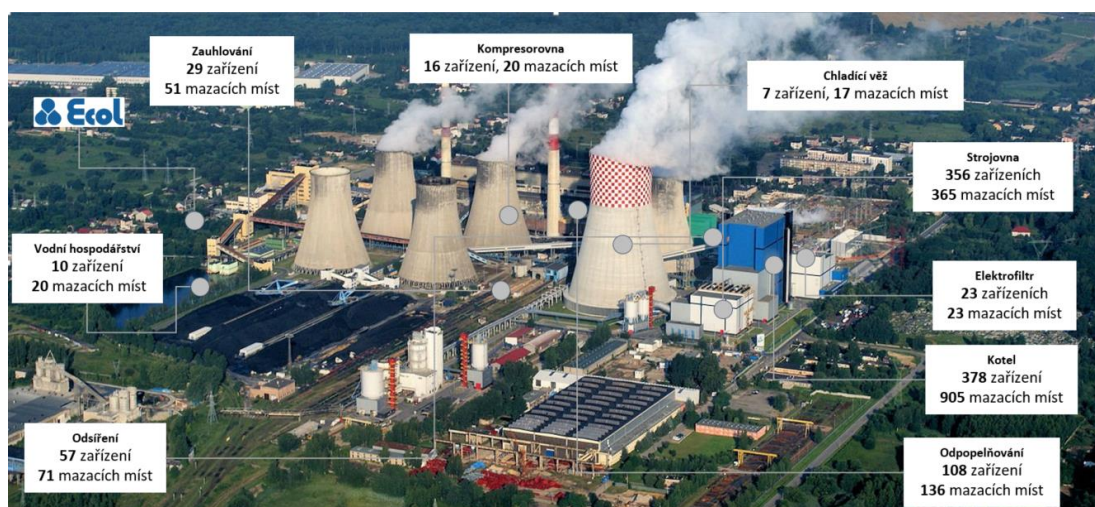
LUBRICATION MANAGEMENT – Management mazání

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

Způsobem, jaký tento personál mazání vykonává ovlivňuje významně provoz strojů. Faktorů, které tento údržbářský výkon ovlivňují a které s tím souvisí je nespočet. Patří sem např. znalost maziv a jejich vhodný výběr nebo např. školení personálu, jak oleje udržovat v kondici, případně sledovat díky diagnostice kondici mazaných strojů.

Z pohledu managementu údržby je vhodné si pokládat otázky, jaké jsou cíle této části údržby. Například: mají za cíl snížit potřebu energie použitím olejů s nižší viskozitou nebo precizním namazáním s moderní diagnostikou? Mají za cíl prodloužení životnosti náplně vhodnou péčí nebo pečlivým výběrem? Řeší optimalizace mazacích míst (např. s ohledem na BOZP nebo třeba minimalizace prostojů), řeší optimalizaci mazacích dávek, optimalizace práce nebo aplikují prvky prediktivní údržby?

Velmi často jsou činnosti mazání považovány za podceňované a vykonávané nedostatečně. Svěřeny jsou nedostatečně proškolenému personálu, který významně ovlivňuje spolehlivost výroby. Pozornost je obvykle věnována pouze klíčovým strojům, přičemž o ostatní zařízení se pečuje nedostatečně a s malou péčí.



Obr. 2: Ukázka rozsahu mazání formou outsourcingu s výčtem obsluhovaných mazacích míst
Ecol Lubrication Management

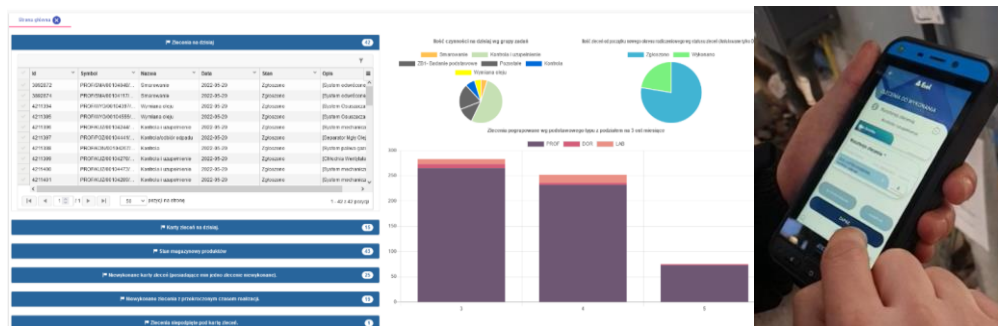
Ecol má ve svém programu mazání vyzkoušený koncept mazání rozvíjený přes 30 let. Důležitým nástrojem je vlastní software údržby (Ecol System) dedikovaný na organizaci celého programu mazacích činností. Od plánování mazacích činností, přes stanovení rozsahu diagnostiky a jejich intervalů. Dále slouží např. k evidenci kompetencí personálů o jejich agendě školení. Vedle vedení agendy úkolů údržby jsou ze systému úkoly generovány do aplikace Smart Ecol na mobilním telefonu, které jsou přiděleny jednotlivým technikům mazání. Ecol Smart je aplikace, která je elektronickou verzí pracovního příkazu, na straně druhé programem pro evidenci činností mazání. **Navíc pomocí RFID čipů se kroky údržby párují s konkrétním mazacím uzlem, eviduje se tím přítomnost personálu a jeho provedeního úkolů. Je tak vyloučené, že úkol zůstane nevykonaný nebo by chybou personálu byl vykonaný na jiném zařízení. Označením mazacích míst RFID čipy je zárukou plnění mazacího plánu.** Mimo jiné je zároveň evidován spotřebovaný materiál, olej, mazivo, případně vzniklý odpad nebo například umožní nahlášení netěsnosti, zvýšeného hluku stroje, případně nízkou hladinu oleje.



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

Ecol má ve svém programu mazání vyzkoušený koncept rozvíjený přes 30 let. Důležitým nástrojem je vlastní software údržby (Ecol System) dedikovaný na organizaci celého programu mazacích činností. S tímto softwarem pracuje každé středisko z důvodu přehledného plánování mazacích činností.

U každého zařízení jsou přehledně popsány a znázorněny mazací uzly, je uveden přehled o plánovaných úkolech, uložena tech. dokumentace, mazací plány apod. Např. odběry vzorků jsou systémem plánované a posléze i výsledky diagnostiky uchovávány zpětně u konkrétních strojů, jejichž maziva se diagnostikují.



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

Jednotlivý úkon údržby (domazání, výměna oleje nebo např. odběr vzorku) se v Ecol System software vytvoří, nastaví se mu požadovaná perioda opakování a vznikne tak plánovaný pracovní příkaz. Takové úkoly jsou pak zasílány výkonným pracovníkům do smartphonu s aplikací Smart Ecol. S touto aplikací je pracovník seznámen s popisem úkolu, má zde mazací plán, zároveň instrukce, jaké použít mazivo a plánované množství. Aplikace slouží nejen k popisu pracovního úkolu, ale rovněž k evidenci této činnosti (jako např. množství použitého maziva, nebo vysoký hluk zařízení, evidence netěsnosti nebo např. oznámení poruchy). Pracovník má v aplikaci i fotodokumentaci k zařízení. Prostředí a funkce tohoto softwaru je vytvořeno na základě požadavků a vlastního vývoje pracovníků Ecol za poslední dekady.



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

Tribodiagnostika

Nezávislá akreditovaná laboratoř Ecol je moderní laboratoří 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 (cca 2g 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 součástích, třecích uzlů. To je cenným nástrojem prediktivní a proaktivní údržby.



Literatura

- [1] MAJKA, Wojciech a KLÍMA, Tomáš. *Interní materiály, dokumenty a fotografie Ecol Sp. z o.o.*, Ecol Industrial s.r.o.
- [2] HILLER, Paul. Why and How to Earn an MLE Certification. *Machinery Lubrication* [online], 2020, no. 4/2020. Available on: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31845/earn-mle-certification>
- [3] HILLER, Paul. ICML Introduces New Certification, Asset Management Standards. *Machinery Lubrication* [online], 2019, no. 6/2019. Available on: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31547/certification-asset-management-standards>
- [4] KLÍMA, Tomáš. Outsourcing mazání v podniku (elektrárny, rafinerie, průmysl). 20leté zkušenosti a postřehy. *Řízení & Údržba průmyslového podniku*, 2013, č. 9/2013.

ROZBOR TRHLIN VE SVARECH KOTLOVÝCH TRUBEK Z OCELI T24

ANALYSIS OF CRACKS IN T24 STEEL BOILER TUBE WELDS

Josef Kasl, David Aišman a Růžena Fikrlová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1108/46, 301 00 Plzeň

Abstrakt

Příspěvek se zabývá materiálovým rozбором trhlín ve svarových spojích trubek vyrobených z oceli T/P24 membránových stěn přehříváku z kotle tepelné elektrárny pracující v nadkritických podmínkách vstupní páry. Celkem bylo hodnoceno deset trhlín převážně z podélných montážních svarů trubka – praporek. Pomocí světelné mikroskopie a řádkovací elektronové mikroskopie byla hodnocena makrostruktura a mikrostruktura na příčných řezech trubkami, změřeny profily tvrdosti HV1 a proveden fraktografický rozbor lomových ploch rozlomených trhlín. Trhlíny jsou iniciovány na vnějším povrchu dominantně na otápené straně kotle na rozhraní svarového kovu a hrubozrnné zóny tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu trubky. Rostou víceméně přímočaře směrem k vnitřnímu povrchu trubky. Oblast iniciace se vyznačuje velmi hrubým původního austenitického zrna a sekundárním vytvrzením vedoucím k tvrdostem okolo 400 HV1.

Trhlíny vznikly zřejmě několika mechanismy – relaxačním praskáním a únavou. Tvorbu trhlíny ovlivnila kombinace více negativních faktorů: neoptimální provedení svarů a defekty v nich, nepříznivý stav mikrostruktury spojený s velkou tvrdostí, vysoká úroveň zbytkových napětí a napětí vyvolaných změnami teploty během odstávek a najíždění kotle.

Abstract

The contribution deals with the material analysis of cracks in the welded joints of pipes made of T/P24 steel of membrane walls of a superheater from a boiler of a thermal power plant operating in supercritical conditions of inlet steam. A total of ten cracks were evaluated, mainly from the longitudinal assembly welds of the tube – flag. Using light microscopy and scanning electron microscopy, the macrostructure and microstructure on cross-sections of the pipes were evaluated, HV1 hardness profiles were measured, and fractographic analysis of the fracture surfaces of the broken cracks was performed. Cracks are initiated on the outer surface, dominantly on the heated side of the boiler at the interface of the weld metal and the coarse-grained zone of the heat-affected region of the base material of the tube. They grow more or less straight towards the inner surface of the pipe. The initiation zone is characterized by a very coarse original austenitic grain and secondary hardening leading to hardnesses around 400 HV1.

The cracks were apparently caused by several mechanisms – relaxation cracking and fatigue. The formation of the crack was influenced by a combination of several negative factors: suboptimal execution of welds and defects in them, unfavorable state of the microstructure associated with high hardness, high level of residual stresses and stresses induced by temperature changes during shutdowns and start-up of the boiler.

Úvod

Cílem práce bylo posoudit charakter a příčiny vzniku vad – trhlín ve svarech trubek membránových stěn (MeS) kotle tepelné elektrárny vyrobených z oceli T24. Tato ocel je určena pro výrobu MeS výparníků a přehříváků pro bloky elektráren pracující v oblasti nad-kritických podmínek páry. Její Trhlíny vznikly zřejmě několika mechanismy – relaxačním praskáním a únavou. Tvorbu trhlíny ovlivnila kombinace více negativních faktorů: neoptimální provedení svarů a defekty v nich, nepříznivý stav mikrostruktury spojený s velkou tvrdostí, vysoká úroveň zbytkových napětí a napětí vyvolaných změnami teploty během odstávek a najíždění kotle

předností, proti původně používaným materiálům, je vyšší creepová odolnost. Hlavní výhodou oceli mělo být získání optimálních vlastností svarových spojů bez následného zpracování po svaření (TZPS).

Ocel se při výrobě MeS používá v zušlechtěném stavu [např. 1] – po ohřevu na normalizační teplotu 1000 °C se rychle ochlazuje. Optimálních vlastností se dosahuje popuštěním v rozmezí teplot 750 °C až 760 °C. Při popouštění při nižších teplotách v rozmezí 550 °C až 680 °C se vyskytuje stádium sekundárního vytvrzování spojeného s výrazným navýšením meze kluzu a meze pevnosti a pokles tažnosti a vrubové houževnatosti. Mikrostruktura materiálu po výrobě je tvořena vyžíhaným bainitem.

Původní předpoklady vypuštění přehřevu a TZPS se pro ocel T24 ukázaly jako nerealistické a aplikace oceli T24 provázely výrazné problémy, kdy docházelo k masivnímu praskání svarů spojů již při výrobě a zkušebním provozu. Ukázalo se, že svařování této ocele vyžaduje dodržení velmi úzkých technologických mezí. Provozní havárie vedly k rozsáhlému sledování této problematiky v Evropě i ČR [např. 2-4]. Za více než 20 let byla provedena řada studií a publikováno velké množství informací. Příčina vzniku trhlin není stále jednoznačně vysvětlena. Nejčastěji je vznik trhlin popisován mechanismem korozního praskání pod napětím (Stress Corrosion Cracking – SSC) nebo relaxačního praskání (Stress Relaxation Cracking – SRC) [např. 5].

Svarové spoje z oceli T24 nejsou po svaření v termodynamicky stabilním stavu a (zejména pokud žíhání nebylo aplikováno, nebo bylo aplikováno za nevhodných podmínek) existují možnosti sekundárního vytvrzování během provozu. To je spojeno se snížením plastických vlastností – zvýšením meze pevnosti a snížením vrubové houževnatosti. Jev sekundárního vytvrzování může nastat na začátku dlouhodobého provozu, a to i když jsou creepové vlastnosti jako celku vyhovující. Kritické jsou přechodové režimy provozu, tj. odstavování kotlů, při nichž se teplota svarů dostává na teplotu okolí a „pevný“ svar nemá dostatečnou plasticitu, aby přenesl napětí z teplotních dilatací jak z odstávky, tak z nabíhání [6]. Problémem může být i termální křehnutí, ke kterému může dojít, pokud jsou materiály vystaveny působení teplot v intervalu 250 °C až 600 °C. V důsledku segregací nečistot jako P, S, Sb, Sn a As na hranicích původních austenitických zrn je porušování lokalizováno na tyto hranice a transkrystalický mechanismus lomu přechází na interkrystalický. O procesu rozhoduje teplota a doba ohřevu, stav mikrostruktury a prvkové složení ocele [1].

Materiál a zkušební metody

Všechny studované trubky o vnějším průměru 33,7 mm a tloušťce stěny 6,3 mm byly vyrobeny z oceli T/P24 podle ASTM 213 (EN 7CrMoVTiB 10-10; DIN 1.7378).

Celkem bylo dodáno postupně osm vzorků s trhlinami z různých výškových úrovní kotle a s různými typy svarů po době provozu asi 31 000 hodin. Provozní teploty se pohybovaly v rozmezí (480 až 495) °C, provozní tlak byl 295 bar. Při rozřezávání vzorků byly nalézány další trhliny kromě těch již objevených na elektrárně. Dohromady bylo tedy sledováno deset trhlin na několika řezech [7,8].

Konstrukce MeS je charakteristická velkými délkami svarových spojů mezi jednotlivými trubkami a plochými plechy (praporky) na jednotlivých panelech a mezi těmito panely. Ty lze rozdělit na:

- automatové podélné svary (AP) mezi trubkami a praporky na jednotlivých panelech MeS; svařování pod tavidlem 121 (SAW) jednovrstvým svarem s přehřevem (150–200 °C) a bez TZPS (vzorek 5);
- ruční „montážní“ svary (MP) prováděné metodou 141 (TIG), při kterých byly „dovařovány“ mezi trubky jednotlivých panelů praporky (vzorky 2, 3, 4 a B);

- c) ruční „montážní“ obvodové svary (MO) mezi trubkami a mezi výkovky přechodových kusů (vidličkami) metodou 141 (TIG) (vzorek 6);
- d) opravné svary (OP) (zjištěných defektů ve svarech) metodou 141 (TIG) (vzorky 5 a 6).

Po dokumentaci vzorků v dodaném stavu z nich byly vyřezány části, které byly použity pro výrobu vzorků pro následující měření. Sledování makrostruktury v neleptaném a leptaném stavu za použití fotoaparátu a binokulární lupy (BL). Pozorování mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie (SM) a řádkovací elektronové mikroskopie (ŘEM). Lokální prvkové složení bylo orientačně stanovováno metodou elektronové disperzní spektroskopie rtg záření (EDX). Pro leptání makrostruktury i mikrostruktury bylo použito činidlo Nital. Ve vybraných místech byly na vzorcích pro hodnocení struktury změřeny profily tvrdosti HV1. U některých vzorků byly vyříznuty oblasti stěny trubky obsahující trhlínu. Tyto vzorky byly rozlomeny trojosým ohybem za pokojové teploty tak, aby byl zpřístupněn povrch původní trhlíny k přímému pozorování. To bylo provedeno pomocí BL a ŘEM.

Výsledky

Společné základní charakteristiky trhlín

Na základě zjištěných výsledků lze shrnout společné rysy podélných trhlín v montážních svarech, jejichž výskyt na MeS kotle výrazně převažuje.

Vznikají převážně na otápné straně kotle.

Oblast(i) iniciace je/jsou na vnějším povrchu svarového spoje praporek – trubka na straně trubky. Iniciace často z více ohnisek.

Poblíž místa iniciace bývá obvodový svar.

Ohniska jsou vázána na rozhraní SK a HZ TOO ZM. Tato oblast vykazuje hrubozrnnou strukturu se sekundárním zpevněním s nízkou hustotou větších karbidů a zcitlivělými hranicemi původních austenitických zrn. Tvrdost materiálu v těchto oblastech je 350 až 400 jednotek HV1.

Trhlíny se šíří relativně přímočaře směrem k vnitřnímu povrchu trubky, postupně přes HZ TOO ZM /SK, JZ TOO ZM a IZ TOO ZM. TOO zasahuje až k vnitřnímu povrchu trubky.

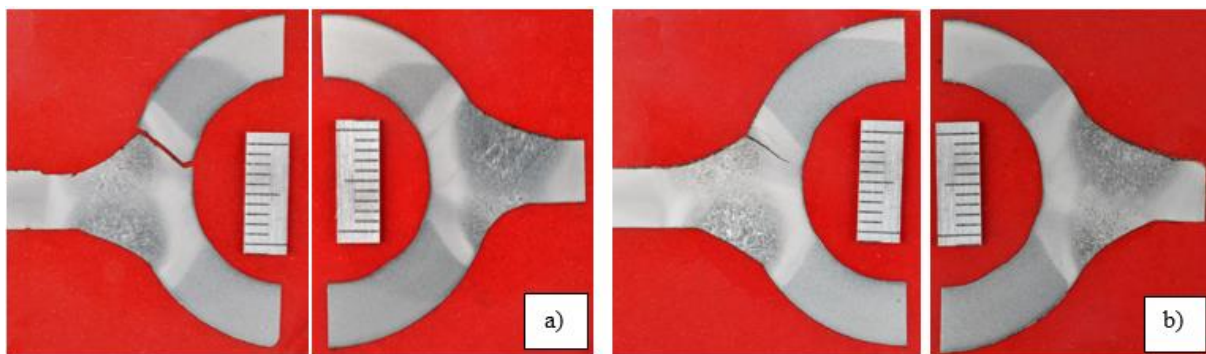
Pokud dosáhnou vnitřního povrchu, k dolomení dojde tvárným usmýknutím v tečném směru k vnitřnímu povrchu trubky. Trhlíny jsou většinou silně rozevřené se zoxidovaným povrchem.

Části trhlíny, které nedosáhly k vnitřnímu povrchu, jsou zakončeny tupě s plastickou mikrodeformací, nebo vykazují interkrystalické šíření s mírným větvením do úzkých trhlinek s částečně zoxidovaným povrchem.

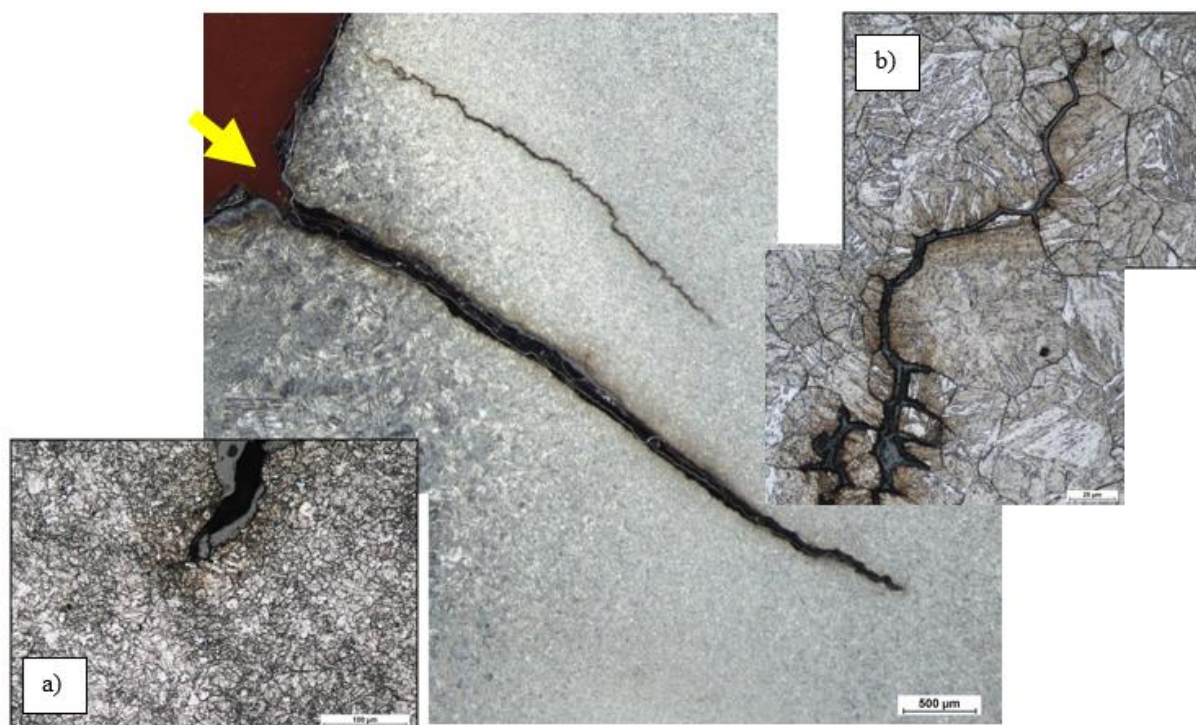
Vedle magistrálních trhlín často probíhají v JZ TOO ZM sekundární trhlíny, které nemusí komunikovat s povrchem. Ty se vždy šíří interkrystalicky.

Příklady výsledků rozborů

Na obr. 1a je ukázána makrostruktura na příčném řezu vzorku 2 v oblasti ručního montážního svaru, ve které trhlína prošla celou stěnou trubky. Je patrné tvárné usmýknutí na konci šíření trubky. Obr. 1b zachycuje jiný řez stejného vzorku, ve kterém nedošlo k růstu trhlíny přes celou stěnu. Přítomna je i sekundární trhlína. Mikrostruktura v místě iniciace primární trhlíny (viz šipka) je ukázána na obr. 2. Na něm je i dobře patrná sekundární trhlína. Tupé zakončení primární trhlíny je vidět na obr. 2a. Obr. 2b ukazuje interkrystalický mechanismus šíření sekundární trhlíny.

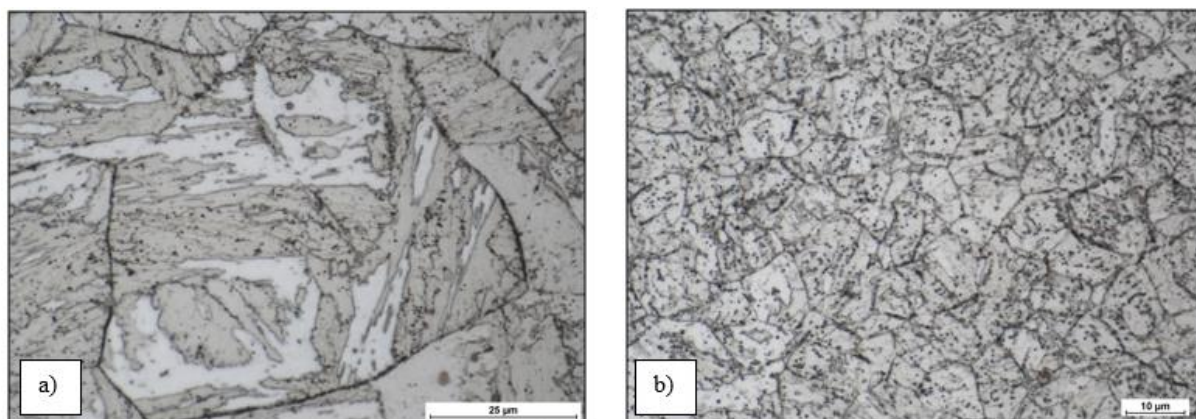


Obr. 1: Makrostruktura na příčném řezu vzorkem 2, a) úplná perforace stěny, b) sekundární trhlina



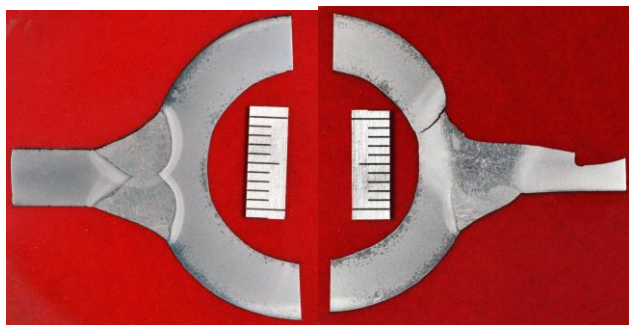
Obr. 2: Mikrostruktura oblasti iniciace primární trhliny: a) zakončení primární trhliny, b) interkrystalické šíření sekundární trhliny

Obr. 3a ukazuje hrubozrnnou bainiticko-martenzitickou mikrostrukturu HZ TOO ZM v oblasti iniciace primární trhliny. Pro srovnání je na obr. 3b ukázán vzhled jemnozrnné mikrostruktury v JZ TOO ZM.

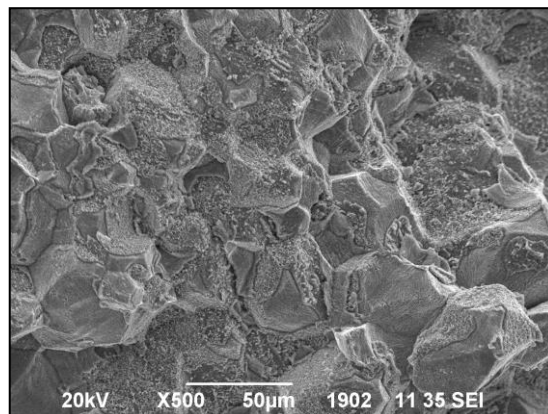


Obr. 3: a) Mikrostruktura oblasti HZ TOO ZM, b) mikrostruktura v oblasti JZ TOO ZM

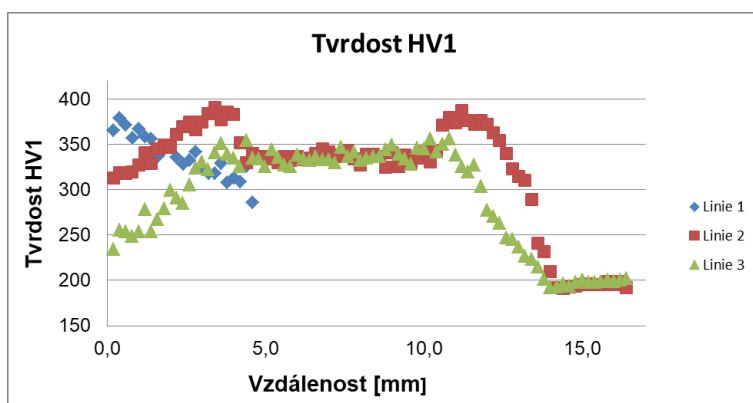
Obr. 4 ukazuje trhlinu v opravném svaru automatového podélného svaru. Povrch v místě iniciace trhliny je vyerodován v důsledku „ofoukání“ parou, která unikala z trhliny v sousední trubce. Graf profilů naměřených tvrdostí HV1 přes svarový spoj je na obr. 5. Polohy jednotlivých měření jsou patrné na připojeném snímku. Z grafu je patrné, že tvrdost v HZ TOO ZM dosahuje hodnot 400 HV1.



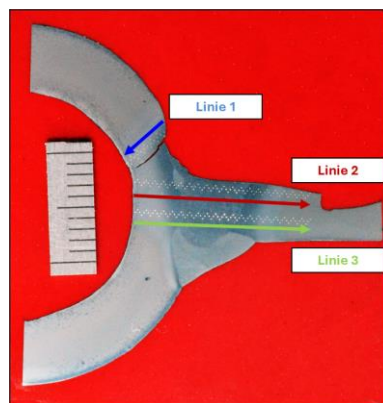
Obr. 4: Makrostruktura na příčném řezu vzorkem 5 (opravovaný automatový svar)



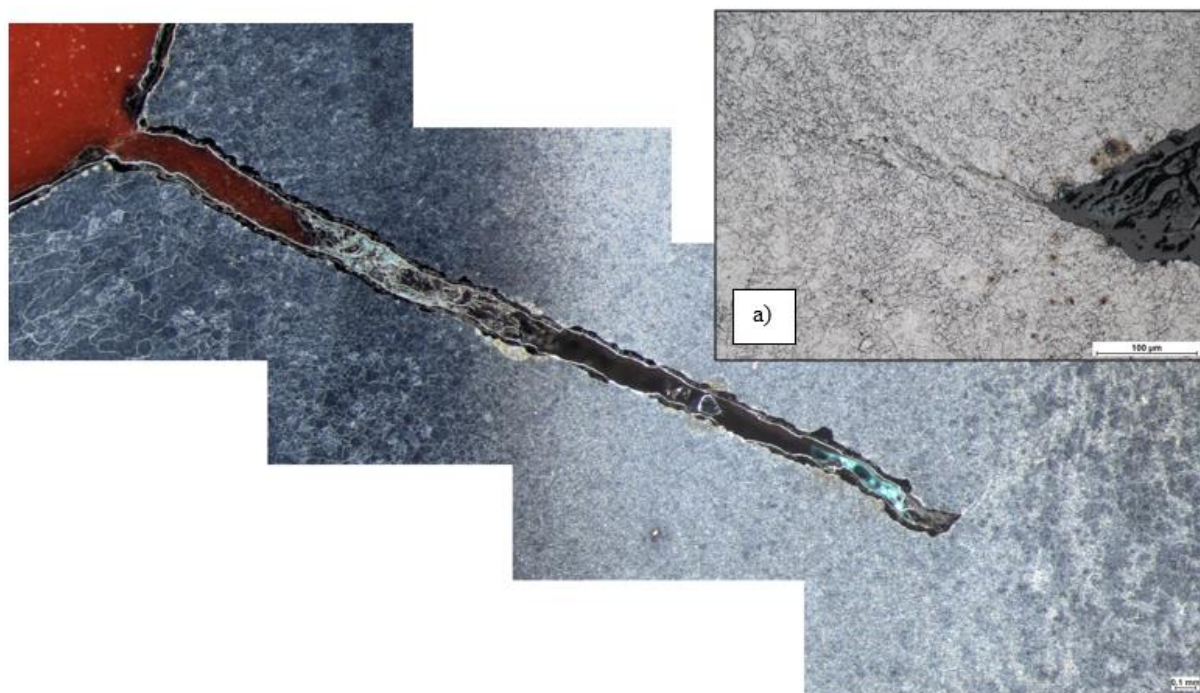
Obr. 6: Lomová plocha vzorku 3.1



Obr. 5: Graf profilů tvrdosti HV1



Obr. 6 ukazuje rozlomenou trhlínu vzorku 3.1. Lom je interkrystalický, fasety jsou částečně pokryté vrstvou oxidů. Na obr. 7 je ukázán jiný příklad šíření trhliny. Zakončení trhliny je tupé s patrnou plastickou deformací materiálu na konci trhliny (obr. 7a). Povrch trhliny je po celou dobu výrazně zoxidován.



Obr. 7: Jiný příklad šíření trhliny

Závěry

V práci bylo hodnoceno celkem deset trhlín na trubkách vyrobených z oceli T24 na MeS kotle tepelné elektrárny pracujícího v USC podmínkách. Pocházely ze čtyř výškových úrovní a po 31 000 provozních hodin. Devět z nich se nacházelo na otápné straně kotle.

Mikrostruktura základního materiálu provozovaných trubek je tvořena směsí feritu a karbidů (vyloučenými na HZ i uvnitř zrn s četnými primárními karbonitridy Ti vyrostlými na drobných globulitických oxidech) téměř bez známek původní bainitické struktury, velikost zrna je poměrně heterogenní (10–150) μm v závislosti na poloze v kotli. Tvrdost základního materiálu provozovaných trubek je (190 až 200) HV1, tvrdost nepoužitých trubek je (200 až 210) HV1.

Byly nalezeny trhliny, které je možné rozdělit do čtyř typů:

- Trhlina na otápné straně v montážním podélném svarovém spoji trubka – praporek vždy na straně trubky;
- Trhlina na neotápné straně vzorku v montážním podélném svarovém spoji trubka – praporek na straně trubky;
- Trhlina na otápné straně v automatovém podélném svarovém spoji trubka – praporek, vždy na straně trubky, a v opravném svaru automatového podélného svarového spoje trubka – praporek na straně trubky;
- Trhlina v oprávaném obvodovém svaru.

Trhlina typu a) způsobují hlavní problémy při provozu elektrárny. Montážní svary výrazně tepelně ovlivňují široké okolí spoje až k vnitřnímu povrchu trubky. Trhlina jsou iniciovány typicky z více ohnisek na vnějším povrchu na rozhraní SK a HZ TOO ZM, případně v SK. Pro oblast iniciace jsou typické hrubozrnné sekundárně zpevněné struktury s bainiticko-martenzitickou mikrostrukturou. V HZ TOO ZM je velmi malá hustota karbidů střední velikosti. Hranice zrn původních austenitických zrn jsou v HZ TOO i SK dobře leptatelné – lze předpokládat jejich zcitlivění. Tvrdost HV1 v HZ TOO dosahuje hodnot 350 až 400 (výjimečně i více) jednotek HV1. K iniciaci trhlín někdy přispívají lokální geometrické a technologické vruby.

Trhliny se šíří přímo směrem přes stěnu trubky a dříve či později vybočují do JZ TOO ZM, IZ TOO ZM a případně i do ZM. Dosahují vnitřního povrchu v úseku kratším, než jsou rozšířené na vnějším povrchu svaru. Po dosažení povrchu dochází k dolomení tvárným usmýknutím. Povrch trhlín je zoxidovaný. Mikromechanismus šíření je mikrostrukturně a fraktograficky pozorovatelný jen u některých trhlín. Jedná se interkrystalické štěpení spojené s nevýrazným větvením trhlín. U jiných trhlín je jejich konec široce rozevřený, zoxidovaný a navazuje na něj oblast plastické deformace.

Trhlina typu d) byla iniciována likvačním defektem z procesu svařování (horká trhlina) propustujícím téměř celou šířkou svarového spoje. Z něj se vyvinula trhlina šířící se transkrystalicky do základního materiálu.

Při iniciaci a růstu trhlíny se zřejmě uplatňuje více mechanismů. Nejpravděpodobnější je relaxační praskání a únava. Případně u sekundárních trhlín v JT TOO ZM se může jednat i o creep.

Tvorbu trhlín ovlivnila kombinace více negativních faktorů: neoptimální provedení především ručních montážních svarů a opravných svarů a případné defekty v nich, nepříznivý stav mikrostruktury spojený s velkou tvrdostí, vysoká úroveň zbytkových napětí po výrobě MeS (svařování jednotlivých panelů) a napětí způsobených dilatacemi při ohřevech a chladnutí během nájezdu ů a odstávek kotle.

Literatura

- [1] PECHA, J. *Zváranie moderných žiarupevných ocelí pre energetická zariadenia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2007.
- [2] MOHYLA, P. - ZAPLETAL, J. Je ocel T24 vhodná pro membránové stěny USC kotlů?. *All for Power*, 2012, č. 1, s. 125-128.
- [3] KUBOŇ, Z. Aplikační vlastnosti svarů z oceli T24 pro membránové stěny. *All for Power*, 2012, č. 1, s. 129-131.
- [4] SZTEFEK, R., VODÁREK, V., SCHWARZ, D. a JAROLÍMOVÁ, M. Microstructural parameters and mechanical properties of the thermally simulated HAZ samples of T 24 steel. In: *METAL 2015*. Brno, 2015, p. 907-909.
- [5] KLENK, A. et al. *Crack Mechanism Understanding and Failure Avoiding Treatment of T24 Tube Material in Advanced Super Critical Coal Fired Steam Generators*. European Commission, 2017, Final Report (CRAMUFAT24).
- [6] MRÁZ, L. et al. Skúsenosti s úžitkovými vlastnosťami ocele T24. *Zváranie*, 2012, č. 5-6, s. 105-113.
- [7] KASL, Josef a FIKRLOVÁ, Růžena. *Rozbor vad kotlových trubek z el. Ledvice*. Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., leden 2023, technická zpráva, VZU-TNZ-52/22/055.
- [8] KASL, Josef a FIKRLOVÁ, Růžena. *Rozbor trhlín na kotlových trubkách z el. ELE*. Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., prosinec 2023, technická zpráva, VZU-TNZ-52/23/100.

SIMULACE ŽÍHÁNÍ SVARŮ MEMBRÁNOVÉ STĚNY KOTLE

SIMULATION OF BOILER MEMBRANE WALL ANNEALING

Ondřej Skála

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

V membránových stěnách kotlů vyrobených z oceli T24 se vyskytují trhliny v oblasti montážních svarů. Jedním z návrhů řešení, jak zamezit vzniku trhlín, je provedení žíhání problematických oblastí membránové stěny. Neboť se jedná o tepelné zpracování, které není běžně prováděno, bylo navrženo nejdříve provést FEA simulaci procesu žíhání pro odhalení možných rizik. Příspěvek popisuje přípravné kroky nutné před provedením vlastní simulace žíhání, proces optimalizace rozložení žíhacích deček a výsledky simulací žíhání různých částí membránové stěny.

Abstract

Cracks often occur in the assembly weld areas of boiler membrane walls made of T24 steel. One of possible solutions to prevent these cracks is to anneal the problematic areas of the membrane wall. Since this heat treatment is not a routine procedure, it was recommended to first perform an FEA simulation of the annealing process to identify potential risks. This contribution outlines the preparatory steps necessary before performing the annealing simulation, the process of optimizing the distribution of annealing elements, and the results of the membrane wall annealing simulations.

LETECKÉ INSPEKCE V ENERGETICE

AERIAL INSPECTIONS FOR THE ENERGY INDUSTRY

Filip Schmidt

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Letecké inspekce vnitřních i venkovních prostor s využitím dronů jsou stále častěji využívanou metodou pro údržbu a monitorování zařízení, zejména v průmyslových a energetických sektorech. Tento příspěvek představuje naše zkušenosti s využitím dronů nejen při vizuálních inspekcích, zdůrazňuje jejich efektivitu při získávání vysoce kvalitních dat a zlepšuje přístup k obtížně dostupným místům. Důležitým faktorem je nejen samotná technologie, ale i kvalita personálu, který tyto systémy obsluhuje.

Abstract

Drones are increasingly employed for aerial inspections of both indoor and outdoor spaces, particularly for equipment maintenance and monitoring in the industrial and energy sectors. This paper presents our experience with drone usage beyond standard visual inspections, emphasizing their effectiveness in capturing high-quality data and accessing difficult-to-reach areas. A key factor in their success is not only the technology but also the expertise of the operators managing these systems.

Úvod

Inspekce průmyslových zařízení jsou zásadní pro zajištění jejich dlouhodobé spolehlivosti a provozní bezpečnosti. Tradiční metody, jako je stavba lešení nebo lanový přístup, jsou nejen nákladné a časově náročné, ale také potenciálně nebezpečné. S příchodem dronů pro vnitřní inspekce bylo možné nahradit tyto rizikové postupy rychlejšími, levnějšími a bezpečnějšími metodami, které zároveň poskytují objektivní data pro následnou analýzu.

Technologické řešení

Moderní bezpilotní letecké platformy využívané pro inspekce jsou vybaveny nejrůznějšími pokročilými technologiemi, jako jsou například LiDAR senzory, termokamery a vizuální kamery s vysokým rozlišením. Tyto nástroje umožňují přesné mapování prostředí, detekci teplotních anomálií a sběr vizuálních dat ve vysoké kvalitě. Klíčovým prvkem těchto inspekcí je možnost rychlého nasazení a bezpečného letu i v náročných prostředích, kde jsou kolize s překážkami nevyhnutelné.

Praktické aplikace

V rámci našich projektů se zaměřujeme především na inspekce v energetickém sektoru. V letošním roce jsme provedli několik významných inspekcí, včetně první úspěšné inspekce přívaděče vodní elektrárny Dlouhé stráně, kde jsme pomocí bezpilotního letadla bezpečně provedli průzkum vodního přívaděče a pořídili kvalitní vizuální data. Tato mise je velkým úspěchem zejména z důvodu, že se o podobné výsledky snažilo několik společností před námi podobnou metodou, ale úspěch se dostavil až s naším řešením.

V případě fotovoltaiických elektráren jsme nasazovali drony vybavené termokamerami pro identifikaci vadných panelů. Paralelně se získáváním termografických dat jsme pracovali na vývoji SW pro autonomní hodnocení FVE panelů s lokalizací defektů, čímž jsme výrazně zkrátily dobu detekce a zvýšili přesnost výsledků.

V neposlední řadě je potřeba říct, že od podzimu roku 2024 jsme schopni provádět ultrazvukové měření tloušťek stěn na technologiích. Tento krok našim zákazníkům umožní mít větší kontrolu nad stavem své technologie bez nutnosti stavby lešení, nebo práce ve výškách.

Význam kvalifikace personálu

Kromě pokročilé technologie hraje klíčovou roli v úspěchu inspekce kvalifikace personálu. Naši operátoři jsou nejen vyškoleni v obsluze bezpilotních prostředků, ale také disponují hlubokými znalostmi v oblasti inspekčních metod, analýzy dat a technologií. Odborná znalost letových parametrů a zkušenosti s plánováním trasy v komplexních prostředích umožňují minimalizaci rizik a maximalizaci efektivity inspekce. Kvalita výsledků inspekce je proto nejen otázkou správné technologie, ale také lidského faktoru.

Výzvy a omezení

Navzdory pokročilým technologiím existují i některé výzvy, například při práci v prostředích s vysokou koncentrací jemného prachu, jako jsou cementárny. Jemný prach může mít vliv na senzory a kvalitu dat, což vyžaduje specifické úpravy a dodatečnou ochranu technologií. Nicméně v běžných průmyslových prostředích jsou tyto technologie velmi spolehlivé a poskytují stabilní výsledky.

Finanční a bezpečnostní přínosy

Nasazení dronů pro inspekce přináší výrazné úspory nákladů, zkracuje dobu potřebnou pro inspekce a zároveň zvyšuje bezpečnost pracovníků. Eliminace nutnosti stavět lešení nebo používat rizikové lanové přístupy snižuje potenciální rizika úrazů a zároveň zrychluje celý proces. Tímto způsobem přispíváme k optimalizaci provozu zařízení a prodlužujeme jejich životnost.

Závěr

Letecké inspekce pomocí dronů představují inovativní přístup ke kontrole a údržbě zařízení, zejména v energetickém sektoru. Spojení moderních technologií a kvalifikovaného personálu umožňuje provádět bezpečné, rychlé a efektivní inspekce, které přinášejí našim klientům jasné finanční a provozní přínosy. Vzhledem k neustálému vývoji těchto technologií a zlepšování jejich aplikací očekáváme další rozšíření možností jejich využití v náročných prostředích.



PROFIL TRHLÍN (INDIKACÍ) TECHNIKOU TFM

CRACKS' PROFILE (INDICATIONS) BY USING TECHNIQUE TFM

Daniel Dopjera

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

V súčasnosti sa v priemysle, ale aj v jadrovej energetike požíva ultrazvuková technika Phased Array (ďalej len ako PAUT). Princíp PAUT už bol známy v rokoch 1960 v oblasti medicíny. Až o niekoľko desaťročí bola PAUT použitá v priemysle. Neustály vývoj výpočtovej techniky posúval PAUT ďalej, napr. ultrazvuková technika Total Focusing Method (ďalej len ako TFM).

Abstract

Currently, the Phased Array ultrasound technique (hereinafter referred to as PAUT) is used in industry as well as in nuclear energy. The principle of PAUT was already known in the 1960s in the field of medicine. It was not until several decades later that PAUT began to be used in industry. The constant development of computer technology pushed PAUT further, e.g. ultrasound technique Total Focusing Method (hereinafter referred to as TFM).

1. Úvod

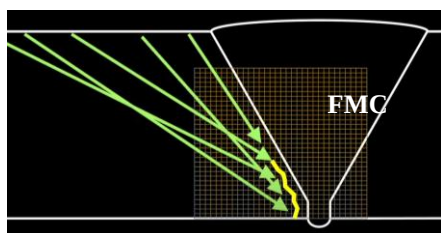
PAUT využíva ultrazvukové sondy s viacerými elementami (meničmi), prevažne 16, 32 a 64, ktoré sú umiestnené na klinoch (predsádkach) z plexiskla. Výsledný ultrazvukový zväzok je potom možné elektronicky riadiť. Aj keď PAUT ponúka lepšie možnosti ultrazvukovej kontroly, stále je obmedzená fyzikálnymi princípmi konvenčného ultrazvuku, na čo je nutné myslieť. To platí pre všetky ultrazvukové techniky, nech sú už prezentované akokoľvek „všemocné“.

2. Technika FMC/TFM

Pri kontrole feritických zvarov PAUT sa bežne využíva 16 až 32 aktívnych elementov a zobrazenie S-Scan s rozsahom uhlov 40° až 70°. Pri rozlíšení 1° tak získavame 31 aktívnych zobrazení A-Scan. Tento ultrazvukový zväzok je možné v blízkom poli danej sondy aj elektronicky riadiť, resp. fokusovať do predom určenej oblasti záujmu (na úkos alebo do koreňa zvaru). V prípade zmeny parametrov ultrazvukového zväzku je nutná nová kalibrácia.

Ultrazvuková technika Full Matrix Capture (ďalej len ako FMC) využíva z PAUT sondy každý element ako vysielač a zároveň aj ako prijímač ultrazvukového signálu. Tzn., že získavame zobrazenie A-Scan z každej kombinácie páru jednotlivých elementov, kedy jeden element vysiela a zvyšok prijíma daný signál (obr. 1).

V prípade PAUT sondy s 32 elementami to je až 1024 zobrazení A-Scan, resp. v porovnaní s PAUT získavame veľké množstvo dát. FMC sama o sebe nie je žiadne zobrazenie, ale veľké množstvo dát, ktoré by bolo možné uložiť v pôvodnom „RAW“ formáte. Avšak vzhľadom na ich množstvo by to nemalo praktický význam.



$$n = E^2 \quad (1.)$$

n – počet zobrazení A-Scan [-]

E – počet elementov [-]

Obr. 1: Princíp FMC

Na získanie výsledného zobrazenia sa používa práve TFM. Pre porovnanie, FMC je zber dát a TFM je rekonštrukcia zobrazenia z týchto dát pomocou algoritmu, resp. módu zobrazenia.

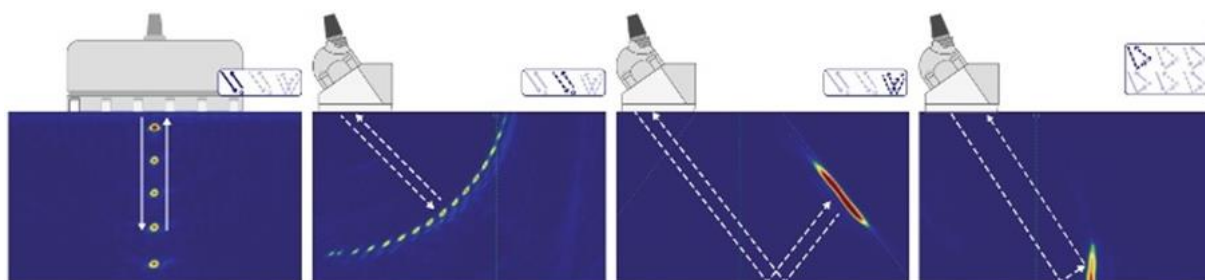
2.1 Nastavenie TFM

Ako už bolo spomenuté FMC je zber veľkého množstva dát, pri ktorom napr. nie je nutná znalosť materiálu (tvar zvaru, rýchlosť ultrazvuku a pod.). Na to aby sme z daných dát získali potrebné zobrazenie, už používame TFM a to tak, že:

1. Definujeme materiál (rýchlosť ultrazvuku a jeho dráhu).
2. Definujeme oblasť záujmu (zvar + TOZ) a polohu PAUT sondy.
3. Definujeme mód pre zobrazenie dát (pozdlžne vlny, priečne vlny, ich kombinácie, atď.).

Vo všeobecnosti je nastavenie TFM v porovnaní s PAUT jednoduchšie, pretože sa nekalibruje rýchlosť ani oneskorenie v kline. Avšak kritické je nastavenie daného módu pre zobrazenie, resp. spracovanie dát. Tzn., že vopred musíme vedieť, aké necelistvosti očakávame, resp. chceme detegovať. Napr. pri kolmej kontrole pozdlžnymi vlnami zvolíme mód LL (priamy odraz pozdlžných vln). Pri kontrole pod uhlom priečnymi vlnami už je možností oveľa viac, napr.:

1. Mód TT (priamy odraz priečných vln) - napr. bodové necelistvosti, trhliny na priamo.
2. Mód TT-TT (nepriamy odraz priečných vln) - napr. studené spoje po odraze.
3. Tandem mód (kombinácie priečných s pozdlžných vln) - napr. kolmé trhliny.

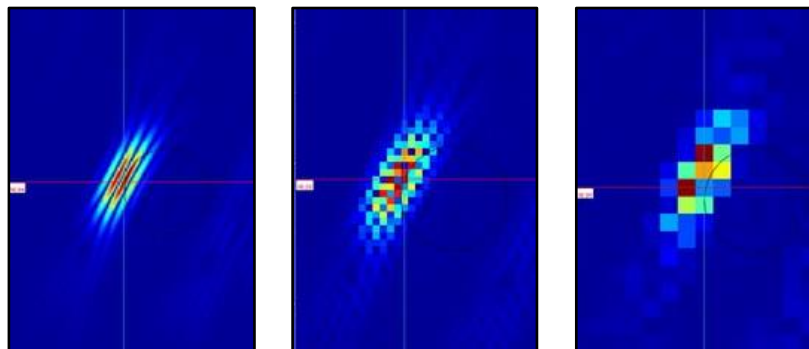


Obr. 2: Príklad módov TFM

Uvedené možnosti sú len výberom z viacerých možných módov. Tandem módy, tak ako aj klasická tandem technika, sú citlivé na zmeny hrúbky materiálu. Odchýlky od nominálnej hrúbky viac než 5% už môžu spôsobiť nesprávne zobrazovanie. Dané nastavenie módu už nie je možné po zbere dát meniť! V závislosti od hardvéru je možné definovať viacero módov (bežne 2 až 4), pričom ale rapídne klesá rýchlosť záznamu.

2.2 Rozlišovacia schopnosť TFM

Kritériom pre rozlišovaciu schopnosť TFM je rozlíšenie amplitúdy. Definuje či výsledné zobrazenie správne zachovalo informáciu o amplitúde, tzn. že pixely v mriežke daného zobrazenia sú dostatočne malé nato, aby bolo možné správne merať max. amplitúdy. Čím sú pixely väčšie, tým je väčšia šanca nesprávne určiť max. amplitúdy (obr. 3).



Obr. 3: Zobrazenie TFM, zľava $\lambda/20$; $\lambda/5$; $\lambda/3$

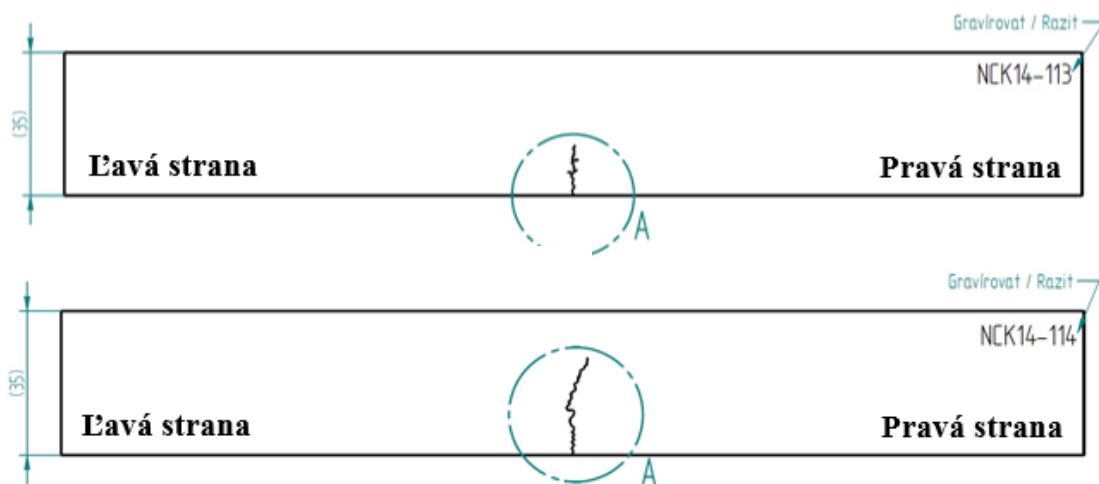
Norma ASME Sekcia V hovorí, že rozlíšenie amplitúdy by nemalo prekročiť 2 dB. V niektorých zdrojoch 4 dB ak určovanie rozmerov indikácií nezávisí od max. amplitúdy. V niektorých prípadoch sa počíta teoretické rozlíšenie amplitúdy, ktoré je založené na stredovej frekvencii a šírke pásma PAUT sondy. V tomto prípade sa neberú do úvahy ďalšie parametre, ktoré ovplyvňujú rozlíšenie amplitúd ako napr. materiál (útlm), klin, relatívna pozícia TFM mriežky voči nim, vzorkovacia frekvencia FMC, atď. Všetky tieto parametre majú vplyv na výsledný ultrazvukový zväzok. Teoretickým výpočtom získame priemernú hodnotu, aké veľké by mali byť pixely, ale táto hodnota by mala byť experimentálne zmeraná na kalibračnej mierke (napr. SDH vývrtov), ak to umožňuje daný ultrazvukový defektoskop.

3. Merací systém

Pri meraní bol použitý ultrazvukový defektoskop OmniScan X3 32:128 s platnou kalibráciou, ultrazvuková sonda 5L32-A32 s klinom SA32-N55S. Na kalibráciu meracieho systému bola použitá austenitická kalibračná mierka PAUT IIW (ISO 19675) s modifikovanou hrúbkou na 50 mm. Akustickou väzbou bola vazelína.

3.1 Skúšobné vzorky

Ako skúšobné vzorky boli použité umelé trhliny vyrobené tzv. drôtovým rezom v austenitickom bloku hrúbky 35 mm (obr. 4).



Obr. 4: Vzorky

Výšky trhlín boli 12,2 a 23,6 mm, pričom hrúbka drôtového rezu bola 0,2 mm. To znamená že šírka trhliny bola o niečo väčšia (cca +0,05 mm). Trhliny boli na protíľahlom povrchu voči sonde.

3.2 Nastavenie PAUT

Nastavenie PAUT si vyžaduje viacero krokov, než nastavenie konvenčného UT alebo TFM. Pri nastavení sa postupovalo nasledovne:

1. Overila sa funkčnosť elementov a profil klinu, resp. jeho uhol.
2. Skalibrovala sa rýchlosť priečných vln na kalibračnej mierke ($3151 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).
3. Overila sa kalibrácia určením polohy vývrtov SDH Ø3 mm na kalibračnej mierke.
4. Skalibrovalo sa oneskorenie v kline, citlivosť a nastavila sa TCG na SDH Ø3 mm.

Bol zvolený sektorový S-Scan s rozsahom uhlov 40° až 70° a s rozlíšením $0,5^\circ$. Rozsah časovej základne bol upravený pre oblasť záujmu (trhliny). Napätie bolo 115 V, spriemerovanie signálu 1, nebol použitý žiadny filter s výnimkou tzv. video filtru, fokusácia zväzku bola na hĺbku 35 mm. Referenčné zosilnenie po nastavení TCG bolo 8,7 dB.

3.2.1 Meranie PAUT

Pri meraní sa určovala výška indikácie pomocou difrakčného echa, z ľavej a pravej strany. Bola zvolená iba 1 vzdialenosť od osi trhliny, a to IO = 20 mm.

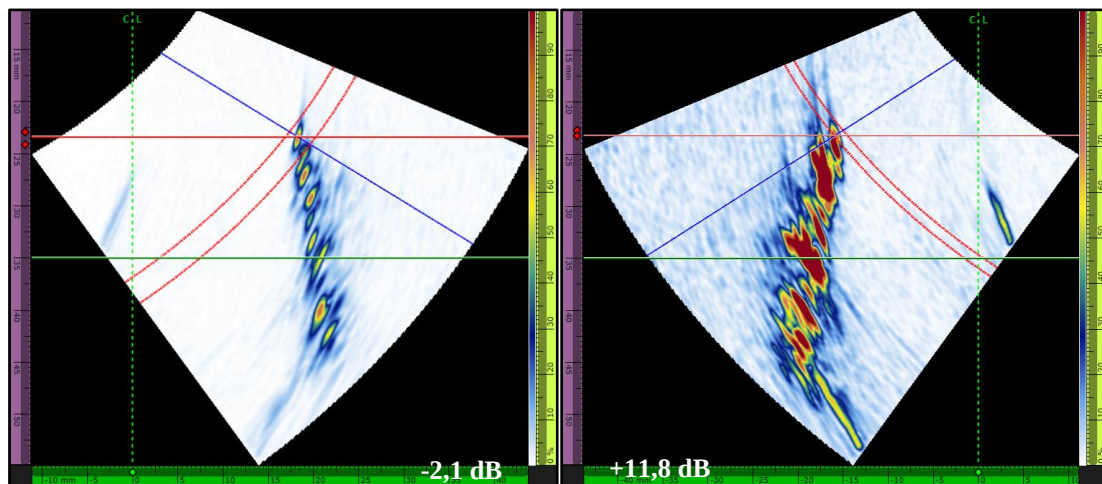
Tab. 1: Namerané hodnoty PAUT

Vzorka	Ľavá strana		Pravá strana	
	H [mm]	R [mm]	H [mm]	R [mm]
NCK14-113	11,60	-0,60	11,77	-0,43
NCK14-114	20,05	-3,55	23,89	+0,29

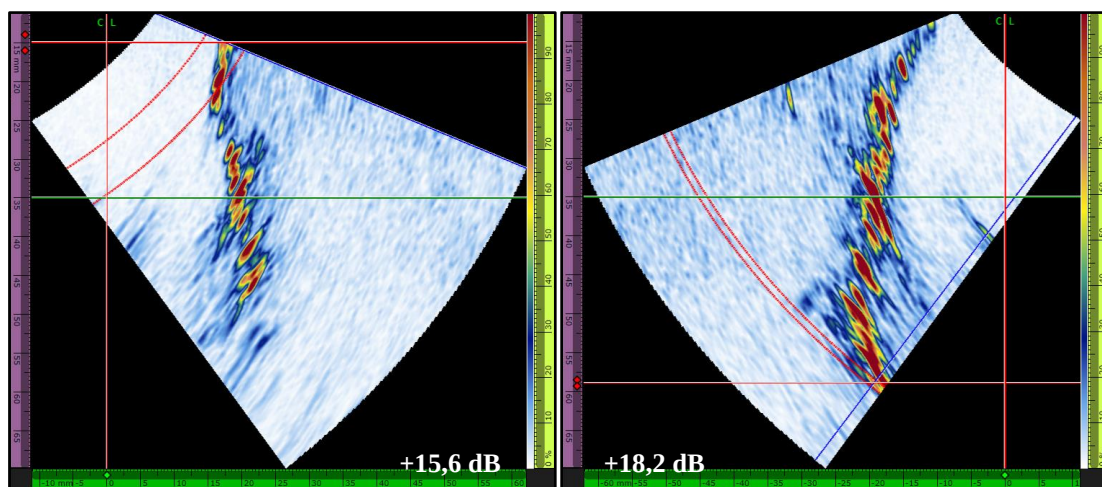
IO - posuv indexu; H - určená výška; R - rozdiel medzi výkresom a určenou výškou

Pri správnom určení výšky je kritická kalibrácia rýchlosti priečných vĺn a oneskorenie v kline, v tomto prípade na rádiuse kalibračnej mierky R50 s toleranciou ± 1 mm v dráhe ultrazvuku. Na obr. 5 a obr. 6 sú jednotlivé zobrazenia S-Scan z ľavej a pravej strany daných vzoriek. Merané difrakčné echo sa vždy zosilnilo na 80% FSH a zmerala sa jeho hĺbka, resp. výška trhliny. Na každom obrázku je uvedené pridané zosilnenie k referenčnému zosilneniu TCG. Namerané hodnoty sú v tab. 1.

Pri vzorke NCK14-113 je zrejmé, že z pravej strany malo difrakčné echo menšiu amplitúdu. Dodatočným meraním bolo zistené, že daná vzorka má väčší útlm na pravej strane (iné spracovanie na pravej strane, tepelné spracovanie, iná štruktúra a pod.).



Obr. 5: NCK14-113, IO = 20 mm



Obr. 6: NCK14-114, IO = 20 mm

3.3 Nastavenie TFM

Nastavenie TFM si nevyžaduje kalibráciu rýchlosti priečných vln a oneskorenia v kline, tak ako pri PAUT. Ultrazvukový defektoskop OmniScan X3 v súčasnosti nevie ukladať FMC „RAW“ dáta ale už len zobrazenia TFM vo zvolenom móde, ktorý v už nameraných dátach nie je možné meniť! Pri nastavení sa postupovalo nasledovne:

1. Overila sa funkčnosť elementov a profil klinu, resp. jeho uhol.
2. Nastavili sa rýchlosti priečných vln $3151 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pozdĺžnych vln $5725 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
3. Nastavil sa mód zobrazenia „Pulse-Echo“ priamy odraz priečných vln.
4. Overilo sa nastavenie určením polohy vývrtov SDH Ø3 mm na kalibračnej mierke.
5. Nastavila sa TCG na SDH Ø3 mm (pre každý IO musí byť nastavená zvlášť).

V tomto prípade bola zistená rýchlosť pozdĺžnych vln priamo na vzorke čelnou sondou. Táto rýchlosť je potrebná, ak by bol použitý mód zobrazenia TFM v kombinácii s pozdĺžnymi vlnami. Napätie bolo 115 V, nebol použitý žiadny filter s výnimkou tzv. video filtru, spracovanie „Full Matrix“, rozlíšenie amplitúdy bolo 2 dB. Fokusácia sa v tomto prípade nenastavuje, resp. fokusácia je teoreticky v celej zvolenej oblasti mriežky TFM.

3.3.1 Meranie TFM

Pri meraní sa určovala výška indikácie pomocou difrakčného echa, z ľavej a pravej strany. V tomto prípade je kritické presné určenie rýchlosti priečných vln, ktorá bola prevzatá z kalibrácie pri PAUT. V tomto prípade bola použitá rovnaká vzdialenosť sondy od osi trhliny, a to $IO = 20 \text{ mm}$.

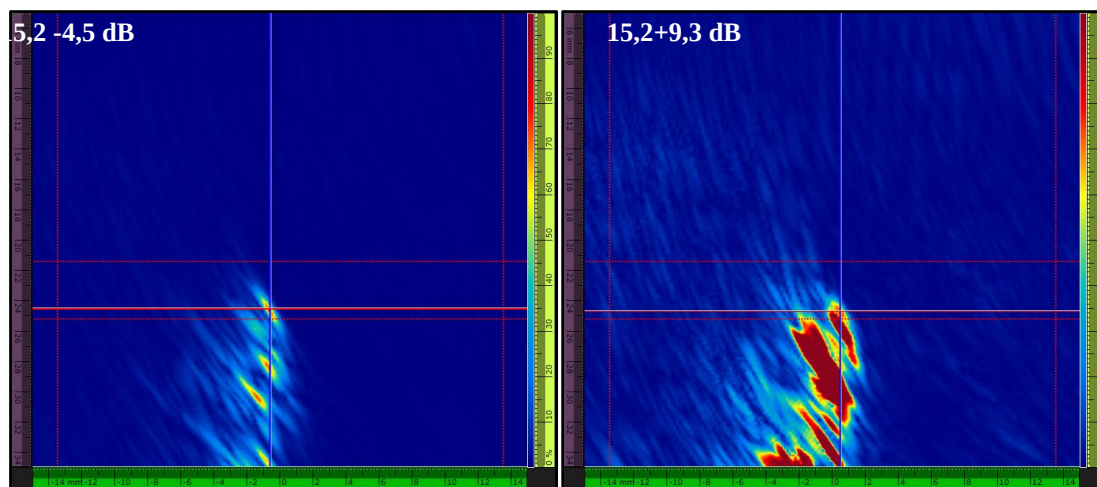
Tab. 2: Namerané hodnoty TFM

Vzorka	Ľavá strana		Pravá strana	
	H [mm]	R [mm]	H [mm]	R [mm]
NCK14-113	10,49	-1,71	10,33	-1,87
NCK14-114	19,51	-4,09	22,30	-1,30

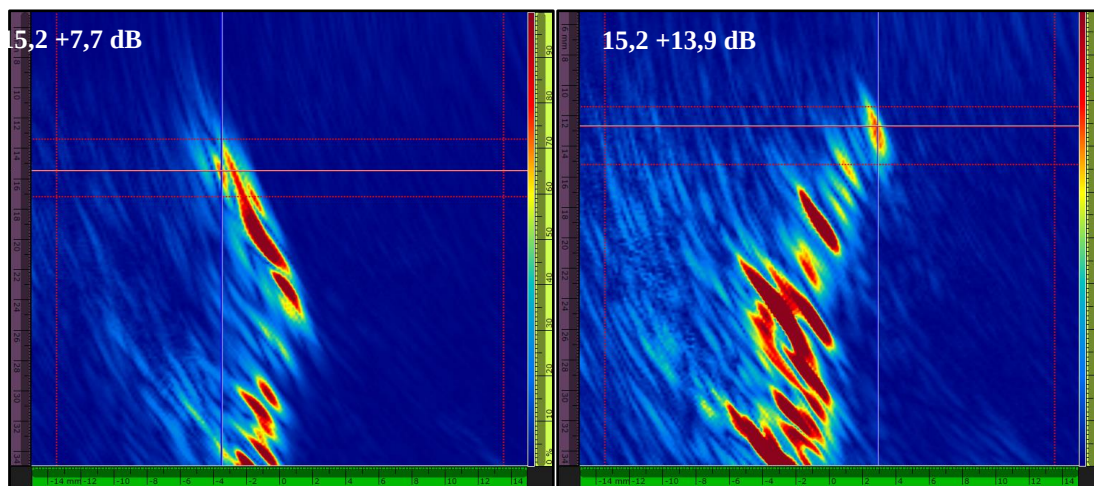
IO - posuv indexu; H - určená výška; R - rozdiel medzi výkresom a určenou výškou

Na obr. 7 a obr. 8 sú jednotlivé zobrazenia TFM z ľavej a pravej strany daných vzoriek. Merané difrakčné echo sa vždy zosilnilo na 80% FSH a zmerala sa jeho hĺbka, resp. výška trhliny. Na obrázkoch je uvedené referenčné zosilnenie TCG a k nemu pridané zosilnenie.

Pri zobrazeniach TFM nebola menená ich orientácia z pravej strany na ľavú, tak ako pri PAUT. Preto sú indikácie od trhliny pri vzorke NCK14-114 zrkadlovo orientované. Pri vzorke NCK14-113 malo opäť difrakčné echo z pravej strany menšiu amplitúdu.



Obr. 7: NCK14-113, IO = 20 mm



Obr. 7: NCK14-114, IO = 20 mm

4. Záver

Je FMC/TFM lepšia než PAUT? Jednoznačná odpoveď nie je a záleží od toho čo daný zákazník potrebuje. Jednoznačne bude FMC/TFM vždy pomalšia než PAUT. Pre porovnanie, nastavenie PAUT v tomto prípade by umožňovalo rýchlosť skenovania až $120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a nastavenie FMC s jedným módom zobrazenia TFM iba $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, pri rozlíšení 1 mm ! FMC/TFM je ďalšia možnosť ako doplniť ultrazvukovú kontrolu a uľahčuje napr. charakterizáciu indikácií a ich orientáciu. Je obmedzená na blízke pole danej PAUT sondy a jej využitie bude určite pri menších hrúbkach materiálu, pri ťažkom prístupe k zvarom a pod. Určite v súčasnosti 100% nenahradí PAUT, ale bude ju dopĺňať a ich kombináciou získavame ďalšie možnosti komplexnej NDT kontroly zvarových spojov. Napr. už sú na trhu PAUT defektoskopy, ktoré dokážu v reálnom čase kombinovať záznam PAUT a FMC.

Literatúra

- [1] BADEAU, Nicolas. *Total Focusing Method Amplitude Fidelity Estimation Using an Analytical Model*. Evident [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Available on: <https://www.olympus-ims.com/en/applications/using-the-total-focusing-method-to-improve-phased-array-ultrasonic-imaging/>
- [2] EVIDENT. *Frequently Asked Questions about TFM*. Evident [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Available on: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/faqs/frequently-asked-questions-about-tfm/>
- [3] REVERDY, Frédéric. *Code Compliant Amplitude Fidelity for TFM*. Eddyfi [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Available on: <https://blog.eddyfi.com/en/code-compliant-amplitude-fidelity-for-tfm>
- [4] HOLLOWAY (Paul). *FMC & TFM in 5 Minutes*. Holloway NDT & Engineering Inc. [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Available on: <https://www.youtube.com/watch?v=V8fc5ZqLxHI&t=62s>

JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ V PRAXI – VÝROBA HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

NUCLEAR MAINTENANCE AND REPAIRS IN PRACTISE – MANUFACTURING OF DISSIMILAR METAL JOINTS

Tomáš Soukup

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Opravy a údržba JE a výroba náhradních dílů jsou součástí životního cyklu jaderné elektrárny (JE) a podléhají požadavkům projektu z doby výstavby a v té době schváleným podmínkám provozu. Současně však s rozvojem legislativy a technických norem v průběhu životního cyklu JE mohou být požadovány další technické požadavky na návrh, konstrukci a výrobu náhradních dílů. Významnou roli hraje i tzv. rozvoj vědy a techniky a aktuální jeho stav. Článek se věnuje přístupu při řešení výroby náhradních dílů JE – heterogenních svarových spojů dílen-
sky vyráběných.

Abstract

Repair and maintenance of NPP and spare parts manufacturing is a part of life cycle of NPP and is subject to the project design requirements of the construction time approved at the time of commissioning. There may be additional technical requirements for design and manufacturing of spare parts based on the further development of standard and legislation. Important role is playing research and development of science and technology and its actual state. Article describes approach to manufacturing of NPPs spare parts – dissimilar metal weld joint manufactured at the workshop conditions.

Životní cyklus JE

Pro pochopení problematiky jaderného opravárenství je potřeba uvést základní rozdělení životního cyklu jaderné elektrárny. Z pohledu technického řešení při návrhu a výrobě dílů je důležitá zejména etapa mezi úvodním projektem po uvedení do provozu a provozování JE. V případě, že během provozu JE (období běžně 40 a více let) dochází ke změnám národních ale i nadnárodních legislativ anebo technických norem pro daný projekt (v našem případě projekt VVER 440 a VVER 1000), vždy se tyto změny musí promítat zpětně až do etapy úvodního projektu. Každá taková změna pak, pokud má dopad do podmínek provozu, promítá se do příslušných dokumentů, na jejichž základě je uděleno povolení k provozu.

Etapy života JE:

- Zrod cyklu od první úvahy, studie proveditelnosti, investiční záměru, aj.
- Úvodní projekt (ÚP).
- Prováděcí projekt (PP).
- Výroba a výstavba.
- Provoz, servis, opravy.
- Ukončení cyklu, vyřazení, demontáž.

Při návrhu výroby nových dílů je tak nutné vždy vycházet z aktuálního stavu projektu (tj. stavu ÚP/PP) a návrh a výrobu dílů je nutné provádět v plném souladu nejen z dnes dobře známou legislativou v podobě vyhlášky č. 358/2016 Sb. ale právě v souladu s požadavky projektu.

Pro lepší pochopení je na následujícím obrázku zobrazena řídicí „pyramida“ pro výstavbu a provoz JE, která je platná vždy v celém životním cyklu projektu JE. Je to struktura platného ÚP/PP.



Obr. 1: Struktura projektování JE (převzato z ÚP pro dostavbu EMO34, ŠKODA Praha)

Oprávenství hlavních komponent JE

Oprávenství je nedílná součást životního cyklu JE, jak již bylo uvedeno. Vedle běžné údržby a servisních prací je potřeba i větších zásahů (oprav) spojených s degračními mechanismy a stárnutím materiálu SKK a výroba nových dílů.

Úzce souvisí s legislativou, technickými předpisy a aplikovanými technickými normami daného projektu, tj. s požadavky ÚP (úvodní / technický projekt, basic design) a navazujícího PP (prováděcí projekt, detail design). Základním východiskem pro výrobu dílů tak je vedle platné legislativy projekt a technické normativy v něm. Samotná znalost daných norem a určitá zkušenost či praxe však není dostatečná.

Jde o multi-disciplinární záležitost, zkušenost, know-how, moderní postupy, potřebný konzervatismus, ale i historická paměť a neustálé rozvíjení úrovně znalostí.

Technické požadavky na heterogenní svarové spoje

ÚP projektu VVER 440 a VVER 1000 zná tzv. původní technické předpisy, které do té či oné míry obsahují potřebné informace (nikoliv však know-how) při řešení výroby svarovaných náhradních dílů primárního okruhu (I. O.), v našem případě heterogenních svarových spojů.

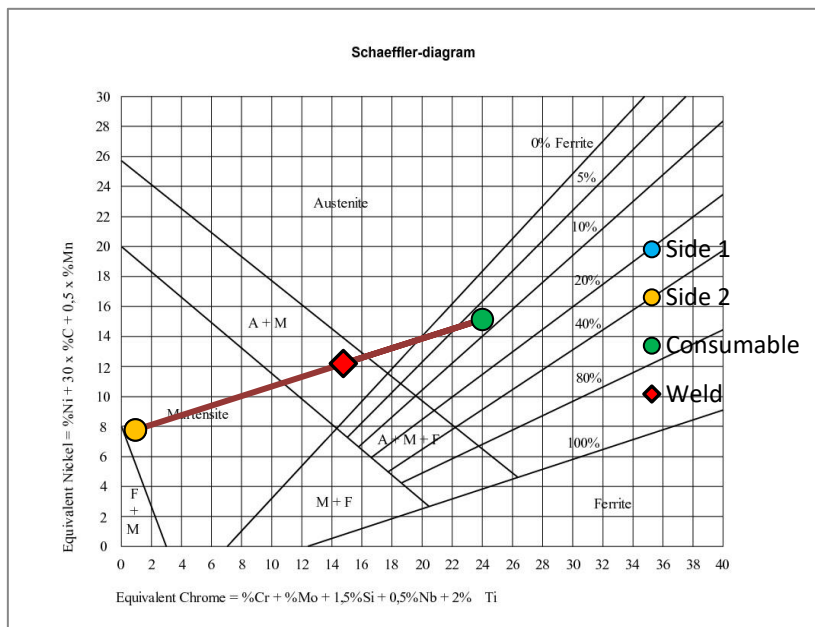
K tomu se od 90.ých let přidávají různé další doplňující a snad i nahrazující předpisy (technické normy). Otázka aktuálního seznamu platné normativní báze pro projekt VVER 440/1000 v ČR je poměrně složitá a může se zdát i poměrně nepřehledná. Přehled normativní báze se zakotvuje do ÚP. Následně musí být dodržována shoda s ÚP při zpracování a udržování platného PP, samozřejmě i v době dlouhodobého provozu JE.

Rámcový nástin normativní báze při řešení heterogenních svarových spojů:

- OP 1513-72, PNAEG – původní projekt (stále platný, podmínka provozu, viz bezpečnostní zprávy), nejkomplexnější zdroj dat vedle dokumentů ÚP/PP daných komponent I. O.
- NDT A.S. I. Sekce I, II, atd. – přejímá pasáže a texty z původních předpisů, řeší otázku heterogenních svarových spojů jen částečně.
- EN ISO 15614-1 – obecná generická norma pro kvalifikování postupů svařování, která pro HTG svarové spoje neobsahuje potřebné a vhodné projektové specifikace, vždy tak spojeno u HTG svarů s EN ISO 15613 a dalšími projektovými požadavky, které sami stanovujeme na základě požadavků projektu a know-how, zkušenosti, výzkumu/ vývoje výrobního závodu, historické paměti.

Heterogenní svarové spoje

V projektu VVER je v I.O. a případně na sekundární straně PG značné množství heterogenních svarových spojů a také antikorozičních návarů. V naprosté většině jde o svarové spoje mezi klasickou austenitickou korozivzdornou ocelí stabilizovanou titanem a nelegovanou ušlechtilou uhlíkovou ocelí, případně ocelí nízkolegovanou. Výstižně tuto situaci ukazuje Schaefflerův diagram na následujícím obrázku. Pro provozní chování svarového spoje je rozhodující tzv. stupeň promíšení mezi nelegovanou ocelí a svarovým kovem použitého svařovacího materiálu.



Obr. 2: Schaefflerův diagram pro ZIO-8 a ocel 22K při cca 40% promíšení svarového kovu se základním materiálem

Při volbě technologie máme tyto základní metody používané v projektu již od dob výstavby:

- svařování pod tavidlem (drát, páska),
- svařování obalenou elektrodou,
- svařování metodou TIG.

Každá metoda má své charakteristiky, které se mnohdy výrazně liší (vnesené teplo, stupeň promíšení, tl. jedné vrstvy návaru, aj.). Proto je nutné například znát při náhradě nějaké komponenty i původní způsob výroby. Základní volbu svařovacích materiálů uvádí OP 1513-72 a PNAEG. Do dokumentace NTD ASI I a IX se převzaly jen některé pasáže, a dokonce vzniká ve vydání 2023 rozpor mezi výše uvedenými sekcemi I a IX. NDT A.S.I. I např. uvádí některé schválené náhrady drátu Sv10Ch16N25AM6 ze skupiny tzv. vysoko niklových slitin (Inconel) bez jakékoliv souvislosti s aplikovatelností u dvou materiálových návarů svarových hran nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Tyto materiály totiž nelze aplikovat společně s klasickými austenitickými svarovými kovy a nelze tak dodržet související konstrukčně-technologické požadavky původních předpisů.

Stejně tak NTD A.S.I. IX uvádí zákaz svarového kovu Sv10CH16N25AM6 pro aplikace, kde je kořen těchto svarů obnažen médiu, a to na základě určitých provozních zkušeností a výzkumu korozního chování rozhraní svarového kovu, ačkoliv dosud nebyl proveden výzkum v rozdílu mezi tímto materiálem a materiálem Sv07Ch25N13.

Schválená náhrada materiálu Sv10Ch16N25AM6, vysoko niklová slitina nebyla zkoumána a ověřována při aplikacích jako jsou heterogenní svarové spoje anebo silové návary těchto heterogenních svarových spojů.

Proto opět ten důraz na znalost projektu a původních předpisů. Tvorba nových normativních požadavků vždy musí být podložena dostatečně rozsáhlým vývojem a výzkumem pro daný projekt. Vedle znalostí normativních požadavků je pak nutné mít rozsáhlé materiálové znalosti chování jak základních, tak svařovacích materiálů. V případě heterogenních svarových spojů a návarů jde o rozsáhlé a komplexní znalosti. Některé otázky, které je nutné brát v úvahu při návrhu výroby:

- stupně promíšení (proces, postup), heterogenita (Schaefflerův diagram),
- vneseného tepla (proces, postup),
- předcházení horkým trhlinám (proces, postup, volba svařovacích materiálů),
- zbytkové feritické fáze,
- korozivzdornosti, životnost v korozním prostředí,
- tepelného zpracování, zbytkových napětí,
- strukturní stability, difúze uhlíku, a předcházení křehkému lomu (životnost),
- požadavky normativní báze na konstrukčně technologické řešení svarů a návarů.

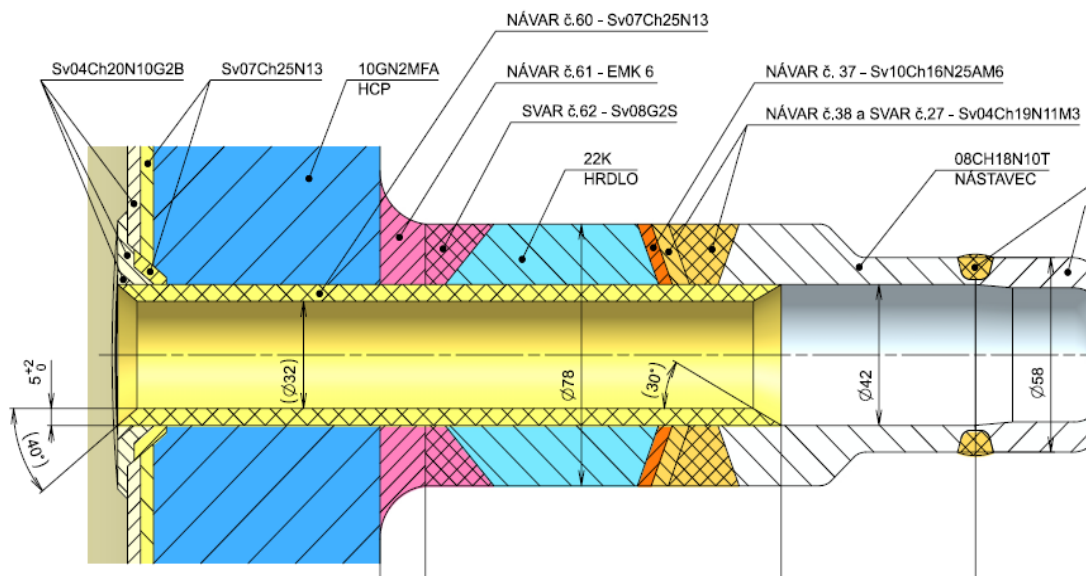
Tab. 1: Svařovací materiály pro heterogenní svarové spoje

Značka	Chemické složení svarového kovu v hm.% (PN ŽAZ, licenční výroba)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Sv10Ch16N25AM6/ EA 395/9	Max. 0,12	0,35 0,70	1,20 2,80	13,50 17,00	22,00 27,00	4,50 7,00
Sv07Ch25N13/ ZIO-8	Max 0,12	Max. 1,0	Max. 2,7	23,00 27,00	11,50 14,00	-

Původní normativní báze nám u svarových spojů austenitických ocelí s nelegovanými uhlíkovými a nízkolegovanými ocelmi do tl. 10 mm včetně umožňuje tyto svary provádět přímo bez předběžných návarů. Dovoleny jsou výše uvedené dva svařovací materiály (dráty, pásky) Sv10Ch16N25AM6 a Sv07Ch25N13, respektive z nich vyrobené obalené elektrody značené EA 395/9 a ZIO-8. Od tl. 10 mm je požadován dvoumateriálový předběžný návar v kombinaci Sv10Ch16N25AM6 a Sv04Ch19N11M3. Toto je základní výchozí pravidlo pro konstrukčně technologické řešení svarových spojů rozdílných strukturníchází, jak se také dříve tyto spoje nazývaly. ŠKODA JS využívá své know-how z výroby heterogenních svarových spojů pro reaktorové komplety při výrobě nových dílů heterogenních svarových spojů.

Pro antikorozi návary platí pravidla jiná, jedná se o složitou problematiku návaru tlakové nádoby reaktoru anebo třeba primárního potrubí z oceli 10GN2MFA, která není předmětem tohoto článku.

Jako příklad té nejnáročnější aplikace je možné uvést výrobu nátrubku s heterogenním svarovým spojem, určeného pro přivaření na primární potrubí JE Temelín. Po rozsáhlých analýzách a vývoji a výzkumu zvolila ŠKODA JS původní materiály schválené v projektu: ocel 22K, ocel 08Ch18N10T (vždy výkovky) a svarové kovy pro svarový spoj Sv10Ch16N25AM6+Sv04Ch19N11M3 a svarový kov pro vnitřní antikorozi návar Sv07Ch25N13, respektive jeho schválenou náhradu 309LSi. Komplexitu řešeného úkolu ukazuje následující barevné schéma s uvedením příslušných materiálů. Za zmínku stojí tzv. nízkouhlíkatý návar na ocel 10GN2MFA, sloužící k zajištění dostatečné odolnosti proti křehkému porušení a zajištění kritické teploty křehkosti přechodu mezi HCP a nátrubkem za nemožnosti provést tepelné zpracování po navaření. Pro vlastní opravu se pak zajišťuje výroba náhradních dílů v podobě svařence nátrubku obsahujícího heterogenní svarový spoj. Jedná se o nejkomplexnější konstrukčně technologické řešení opravy, jaké dosud bylo v ŠKODA JS řešeno.



Obr. 3: Řez konstrukčně technologickým řešením nového nátrubku na HCP JE Temelín

Následující obrázek ukazuje řez makrostrukturou heterogenního svarového spoje nátrubku primárního potrubí ETE vyráběného ve ŠKODA JS. Jde o spoj mezi 08Ch18N10T a 22K s aplikací dvoumateriálového návaru Sv10Ch16N25AM6+Sv04Ch19N11M3 a podloženého z vnitřní strany antikoročním návarem z materiálu Sv07Ch25N13 (případně z materiálu schválené náhrady, typu 309LSi).



Obr. 4: Řez heterogenním svarovým spojem hrdla pro primární potrubí JE Temelín



Obr. 5: Výroba navařováním předběžného dvouvrstvého návaru na ocel 22K



Obr. 6: Pohled na svaření dílů z oceli 22K opatřené návary a oceli 08Ch18N10T na orbitálním svařovacím zařízení a pohled na finální obrobek



Obr. 7: Příklad hotových heterogenních svařenců malých rozměrů Ø 38×6 mm

Literatura

- [1] NDT A.S.I. *Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů.*
- [2] OP 1513-72 (Ae 3510/Dok). *Základní zásady svařování a navařování uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení.* (pracovní překlad ŠKODA JS)
- [3] PK 12514-72 (Ae 3511/Dok). *Pravidla kontroly svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení.* (pracovní překlad ŠKODA JS)
- [4] PU (Ae 2944/Dok C). *Předpisy pro výstavbu a bezpečný provoz zařízení jaderných energetických zařízení.* Vydání ČSKAE.
- [5] PNAE G-7-008-89. *Předpisy konstrukce a bezpečného provozu zařízení a potrubí jaderných energetických zařízení.* (pracovní překlad ŠKODA JS)
- [6] PNAE G-07-009-89. *Zařízení a potrubí jaderných energetických zařízení. Svařování a navařování. Základní předpisy.* (pracovní překlad ŠKODA JS)
- [7] PNAE G-07-010-89. *Zařízení a potrubí jaderných energetických zařízení. Svarové spoje a návary. Pravidla kontroly.* (pracovní překlad ŠKODA JS)

MANIPULÁTORY A ROBOTICKÉ SYSTÉMY PRO JE A ENERGETIKU

MANIPULATORS AND ROBOTIC SYSTEMS FOR NPP AND POWER INDUSTRY

Tomáš Trojan

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Přínos manipulátorů v energetice je již historicky znám - zvýšení kvality, produktivity, výkon činností v jinak nepřístupných oblastech, snížení radiační zátěže atd. Centrum výzkumu Řež dlouhodobě monitoruje trendy především v provádění NDT kontrol a v rámci neustálého zlepšování stavu techniky realizuje na vybrané aplikace manipulátory a robotické systémy, čímž nabízí svým zákazníkům všechny benefity automatizovaných kontrol a velkou měrou tím přispívá k zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti provozu energetických zařízení. V tomto článku budou blíže představeny manipulátor pro objemové ultrazvukové (UT) kontroly odvzdušňovacích a kontrolních trubiček (OKT) parogenerátoru elektrárny Temelín, manipulátor pro objemovou UT kontrolu vnějšího svaru kolektoru parogenerátoru (PG) elektrárny Dukovany a manipulátor pro UT kontrolu izolátorů.

Abstract

The benefit of using manipulators and robotic systems in energy is already known. It increases quality, improves inspections in inaccessible areas, reduces the radiation load of employees, etc. The Research Centre Řež continuously monitors trends in NDT processes and develops manipulators and robotic systems as part of improving the technical level, which is a great benefit for all customers by increasing the safety and reliability and knowledge of energy equipment. In this member will be introduced: Manipulator for ultrasonic testing of venting and control pipes of NPP Temelín's steam generator, manipulator for ultrasonic testing of NPP Dukovany's steam generator collector's weld and manipulator for ultrasonic testing of ceramic isolators.

Úvod

V rámci vývojových činností se snažíme monitorovat poslední světové trendy v poli energetiky, ale i automobilovém průmyslu a armádních technologiích, a to s plným uvědoměním možnosti využití umělé inteligence. Manipulátory, které navrhujeme, vyvíjíme, testujeme a kvalifikujeme, musí splňovat přísná kritéria nejen z hlediska funkčnosti, spolehlivosti, ale musí maximálně respektovat očekávané přínosy. U některých manipulátorů je to robustnost, jednoduchost a bezporuchovost v nejtěžších podmínkách nasazení, u jiných to může být mikropřesnost navádění s využíváním umělé inteligence a pokročilým způsobem navádění. Následně představené manipulátory patří spíše do první kategorie, přesto je na nich mnoho technicky zajímavých uzlů, které stojí za detailnější popis.

Manipulátor OKT – Vilda

Manipulátor s poetickým názvem Vilda byl vyvinut pro UT kontrolu OKT (odvzdušňovacích a kontrolních trubiček) rozměru OD 16×4 mm, které jsou umístěny uvnitř PG JE Temelín. Kontroly zajišťuje 8 UT sond, které jsou uloženy v přesně definovaných roztečích. Největší výzvou konstrukčního týmu bylo zajistit veškeré požadavky na přesnost uložení, nepřetržitou vazbu UT sond a precizní záznam polohy manipulátoru.



Obr. 1: Manipulátor OKT nasazený na zkušební trubce

UT sondy jsou uloženy v kroužcích - 4 sondy na 1 kroužek, z toho 2 sondy v každé jeho polovině. Kroužky jsou rozebíratelné, dělicí rovina je vybavena permanentními magnety, každý kroužek je vybaven rozvodem vody podmyváání UT sond a speciálním na míru vyráběným pryžovým těsněním. Vzájemnou polohu UT sond zajišťuje speciálně navržený „vnější kardan“ díky kterému je manipulátor schopen kopírovat veškeré ohyby OKT trubičky, přičemž zajišťuje perfektní tuhost uložení kroužků vůči tělu manipulátoru. Precizní záznam polohy zajišťují 2 v těle manipulátoru integrované enkodéry. Jeden zaznamenává axiální pohyb a druhý rotaci okolo trubky. V rámci realizace projektu bylo potřeba překonat mnoho velkých výzev. Tou největší byla nutnost miniaturizace celého zařízení tak, aby strojní návrh respektoval požadavek na nejmenší světlou průjezdnou výšku manipulátoru, která činí 15,5mm! Za tím účelem musel být vyvinut miniaturní systém enkódování, bylo potřeba vyrobit vstříkolisovací formu na pryžové těsnění atd.



Obr. 2: Manipulátor z pohledu své nejmenší světlé průjezdné výšky

Během návrhu manipulátoru byl brán velký zřetel na robustnost provedení a uživatelský komfort – tedy především volbu materiálů a povrchových vrstev, vedení kabelů a hadiček na vodu, napojení na řídicí systém a v neposlední řadě také estetické hledisko a precizní transportně skladovací obal.

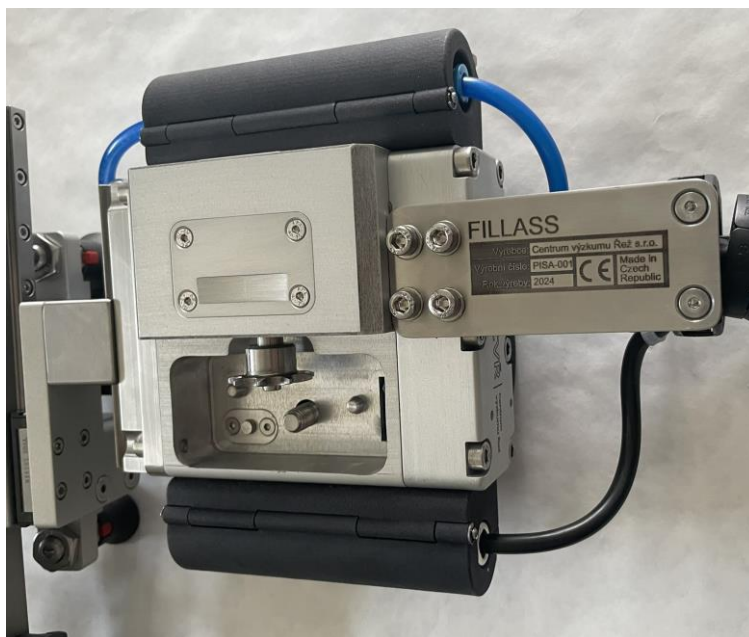
Manipulátor pro UT kontrolu vnějšího svaru kolektoru PG elektrárny Dukovany – Fillass

Tento manipulátor byl postaven na modulární koncepci manipulátoru WOL (weld overlay), který byl prezentován v roce 2023. Právě modulární koncepce navrhovaných manipulátorů zajišťuje výbornou flexibilitu dodávek a spolehlivost technického řešení. Manipulátor, který dostal taktéž velmi poetický název Fillass, je založen na principu dělené obruče, která se uchycuje na primární potrubí a opírá se o kuželovou část kolektoru, čímž umožňuje perfektní rektifikaci.



Obr. 3: Sestava manipulátoru Fillass na hrdle kolektoru PG

Po obvodu kruhu je uloženo prizmatické vedení s vozíkem, na který je namontován samotný manipulátor. Tělo manipulátoru zajišťuje radiální pohyb a je zcela totožné s manipulátorem WOL. Ramínko, které vykonává axiální pohyb sondy, je uzpůsobeno zkoušené ploše svaru. Manipulátor je multifunkčně využitelný pro klasické UT kontroly i pro metody phased array. Stejně jako u všech ostatních manipulátorů navrhovaných a dodávaných společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. je v návrzích brán velký zřetel na ergonomii, intuitivnost ovládání a ukrytí všech choulolistivých komponent, hadiček, kabelů a výkonných prvků tak, aby výsledné technické řešení bylo ergonomické, elegantní a empatické.



Obr. 4: Detail těla manipulátoru Fillass s integrovanými výkonnými a ovládacími prvky

V neposlední řadě je každé zařízení projektováno a konstruováno s ohledem na montážní jednoduchost a skladovací miniaturizaci.

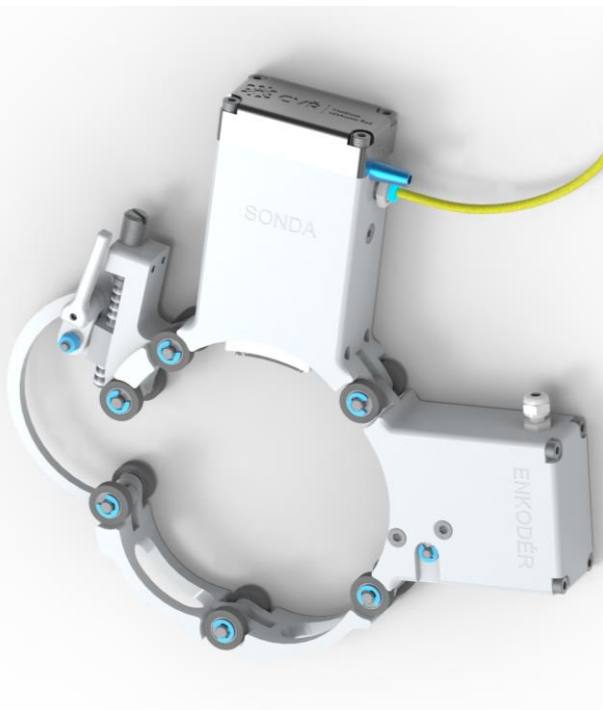


Obr. 5: Skladovací systém manipulátoru Fillass

Manipulátor na kontrolu izolátorů – Miloš

Tento manipulátor je určen pro UT kontrolu izolátorů. UT sonda je uložena v odpruženém domečku a je vybavena přívodem vody pro držení ultrazvukové vazby. Vedle sondy je umístěn enkodér, který je technicky totožný s enkodéry používanými v ostatních manipulátorech dodávaných společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. (např. OKT, WOL, Fillass, Lop atd.). Technicky

vzato je tento manipulátor velmi jednoduchý, ale co stojí za zmínku, byla jeho doba dodání. Od vznesení požadavku zákazníka po předání hotového, vyrobeného a odzkoušeného manipulátoru uplynuly pouhé 2 měsíce.



Obr. 6: Manipulátor pro kontrolu izolátorů – Miloš

Závěr

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

Poděkování

Největší poděkování patří kolegům na straně zákazníků, kteří se na nás s důvěrou obracují a umožňují nám se rozvíjet a seberealizovat v odvětví, které nás nekonečně baví a dává lidstvu smysl.

NEDESTRUKTIVNÍ ZKUŠEBNÍ TECHNIKY PRO KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ DEGRADACE TEPELNÉHO STÁRNUTÍ VNITŘNÍCH ČÁSTÍ VVER

NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THERMAL AGING DEGRADATION OF INTERNAL COMPONENTS IN VVER

Josef Strejcius, Zdeněk Fulín a Zbyněk Špirit

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Příspěvek popisuje NDE techniky, které jsou citlivé na změny mikrostruktury kovových materiálů na mikroskopické a nanorozměrové úrovni: měření termoelektrické síly (TEP) a test elektrochemické potenciokinetické reaktivace (DL-EPR) pro hodnocení provozní degradace komponent vnitřních částí lehkovodních reaktorů, vyrobených z materiálů primárně související s technologií VVER. Měření TEP je citlivé na nejmenší variace v materiálových vlastnostech bez ohledu na povrchovou úpravu, tvar a velikost testovaného materiálu. Metoda DL-EPR je citlivá na tvorbu částic, jako jsou například karbidy chromu v případě austenitických korozi-vzdorných ocelí nebo α -fáze (FeCrMo) v duplexních korozi-vzdorných ocelích, a na lokální koncentrační rozdíly legujících prvků.

V práci bylo studováno stárnutí křehnutí austenitických slitin 08Ch18N10T, 08Ch18N12T jak v počátečních stavech, tak po umělém stárnutí při teplotě 450 °C a po 28 letech provozu. Výsledky termoelektrických a elektrochemických měření studovaných materiálů byly porovnány se změnami v mikrostruktuře a mechanických vlastnostech. Tato práce byla provedena v rámci probíhajícího projektu HORIZON-EURATOM DELISA-LTO zaměřeného na zvyšování provozní bezpečnosti během prodlužování životnosti jaderné elektrárny prostřednictvím včasné predikce potenciálních poruch.

Abstract

The paper describes NDE techniques that are sensitive to changes in the microstructure of metallic materials at microscopic and nanometric levels: thermoelectric power (TEP) measurement and the electrochemical potentiokinetic reactivation test (DL-EPR) for assessing the operational degradation of components in the internal parts of light water reactors, made from materials primarily related to VVER technology. TEP measurement is sensitive to the smallest variations in material properties regardless of surface finish, shape, and size of the tested material. The DL-EPR method is sensitive to the formation of particles, such as chromium carbides in the case of austenitic stainless steels or the α -phase (FeCrMo) in duplex stainless steels, and to local concentration differences of alloying elements.

The study investigated the aging embrittlement of austenitic alloys 08Ch18N10T and 08Ch18N12T both in their initial states and after artificial aging at 450 °C, as well as after 28 years of operation. The results of the thermoelectric and electrochemical measurements of the studied materials were compared with changes in microstructure and mechanical properties. This work was carried out as part of the ongoing HORIZON-EURATOM DELISA-LTO project, aimed at enhancing operational safety during the extension of nuclear power plant lifetimes through early prediction of potential failures.

Úvod

Tendence komponent jaderných elektráren (JE) měnit své mechanické a fyzikální vlastnosti v průběhu jejich provozní životnosti je běžně označována jako "stárnutí." Klíčové faktory ovlivňující proces tepelného stárnutí zahrnují teplotu, mikrostrukturu a čas. Materiály obzvláště náchylné k tepelnému stárnutí zahrnují litou nerezovou ocel, svary z austenitické nerezové oceli a některé martenzitické oceli bohaté na chrom.

V této práci je diskutována možnost použití dvou neinvazivních zkušebních technik pro stanovení provozního stárnutí komponent jaderných zařízení vyrobených z austenitických ocelí 08Ch18N10T and 08Ch18N12T – elektrochemických polarizačních měření a měření termoelektrické síly (Seebeckova koeficientu).

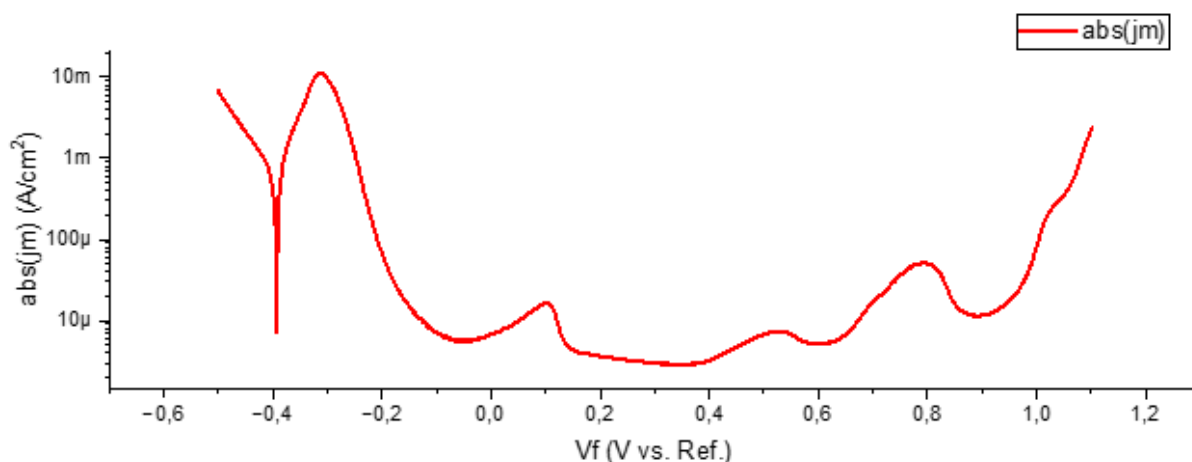
Textová část příspěvku popisuje metodiky měření, modifikované pro použití v provozních podmínkách. Výsledky měření materiálů po dlouhodobém provozu budou prezentovány v rámci konference.

Test elektrochemické potenciokinetické reaktivace

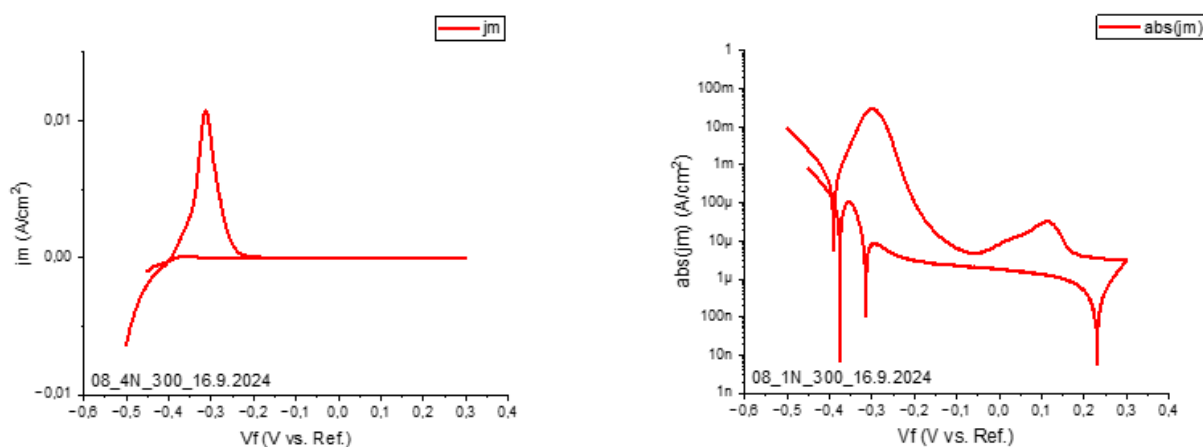
Test elektrochemické potenciokinetické reaktivace (EPR) je založen na měření polarizačních křivek. Dvousmyčkový potenciokinetický polarizační test (DL-EPR) je elektrochemická metoda používaná k hodnocení citlivosti korozivzdorných ocelí na mezikrystalovou korozi (IGC). Princip testu spočívá v měření elektrochemických proudů při zvyšování potenciálu aplikovaného na testovaný materiál ve dvou smyčkách – první smyčka je anodická, kde se měří celková aktivace materiálu, a druhá je smyčka, která měří zpětnou reaktivaci. Oproti postupu doporučenému v normě [1] upravený postup je založen na měření v průtočné měřicí cele (obr. 1) a bez přidavku aktivátoru (thiokyanatanu). Příklady polarizačních křivek oceli 08Ch18N10T jsou na obr. 2 až obr. 4.



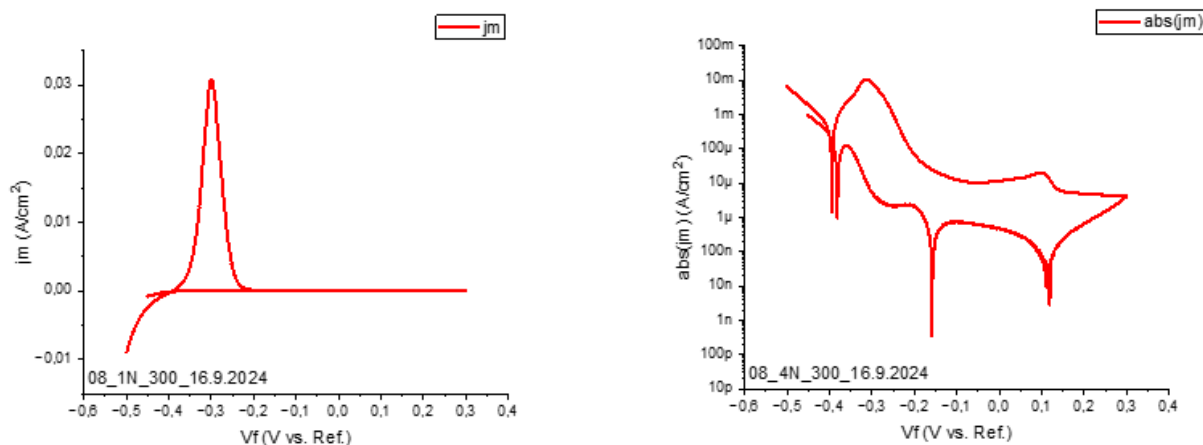
Obr. 1: Vzorek a průtočná měřicí cela



Obr. 2: Potenciokinetická polarizační křivka oceli 08Ch18N10T



Obr. 3: Nezcitlivěná ocel 08Ch18N10T



Měření termoelektrické síly (TEP)

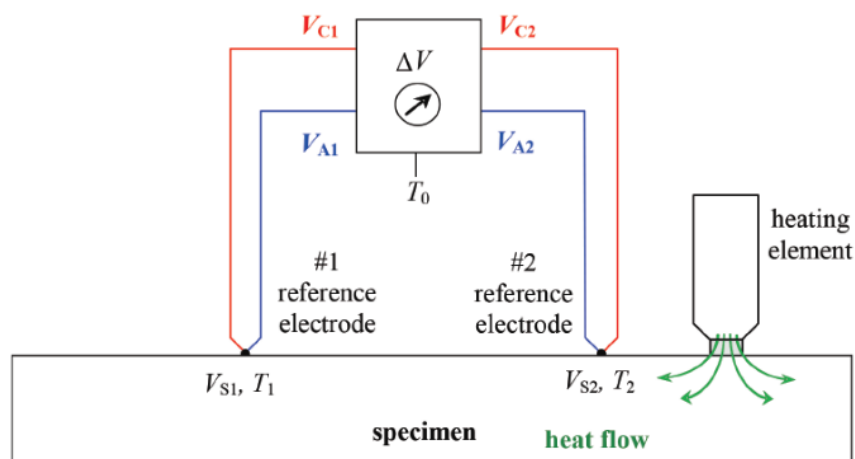
Termoelektrický jev (termoelektrický efekt) označuje proces, při kterém teplotní rozdíl mezi dvěma materiály generuje elektrické napětí nebo proud. Tento jev lze využít k měření tzv. **termoelektrické síly** (v angličtině známé jako „thermoelectric power“ nebo také „Seebeckův koeficient“).

Termoelektrická síla se měří tak, že se zaznamenává rozdíl napětí generovaný mezi dvěma různými vodiči, pokud jsou na různých teplotách. Tento rozdíl napětí je přímo úměrný teplotnímu gradientu a vlastnostem daných materiálů. V praxi se tento efekt využívá například v termočláncích nebo termoelektrických generátorech.

U ocelí je termoelektrická síla (TEP) obecně nízká, obvykle v řádu jednotek až desítek mikrovoltů na °C. Průměrná chyba měření TEP se však může lišit v závislosti na konkrétním materiálu, metodě a vybavení. Typická měřicí chyba u běžných experimentů TEP může být v rozmezí 0,5–2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Tato chyba je ovlivněna faktory, jako je šum, stabilita teplotního gradientu, přesnost termočlánků a kalibrace. Pokud jsou podmínky velmi dobře kontrolovány a měřicí aparatura je přesná, může být chyba i menší, například kolem 0,1–0,2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, ale to je spíše pro laboratorní podmínky s pokročilými metodami měření. Dalším faktorem, na který je třeba brát ohled při měření a srovnávání různých vzorků je skutečnost, že Seebeckův koeficient je veličina teplotně závislá.

Pomocí měření termoelektrické síly (TEP) lze sledovat tepelné stárnutí ocelí, změny mikrostruktury materiálu vlivem tepelného zpracování nebo dlouhodobého působení vysokých teplot. TEP je citlivý na změny elektronové struktury a fázové složení materiálů.

Navržená metodika je založena na měření elektrického napětí mezi dvěma body na povrchu vzorku, v místech lišících se teplotou. Teplotního gradientu je dosaženo lokálním elektrickým ohřevem v okolí jednoho z měřících bodů. Pro přesné měření teploty v měřících bodech jsou použity termočlánky, viz obr. 5. Detailní rozbor problematiky je v dokumentu EPRI [2].



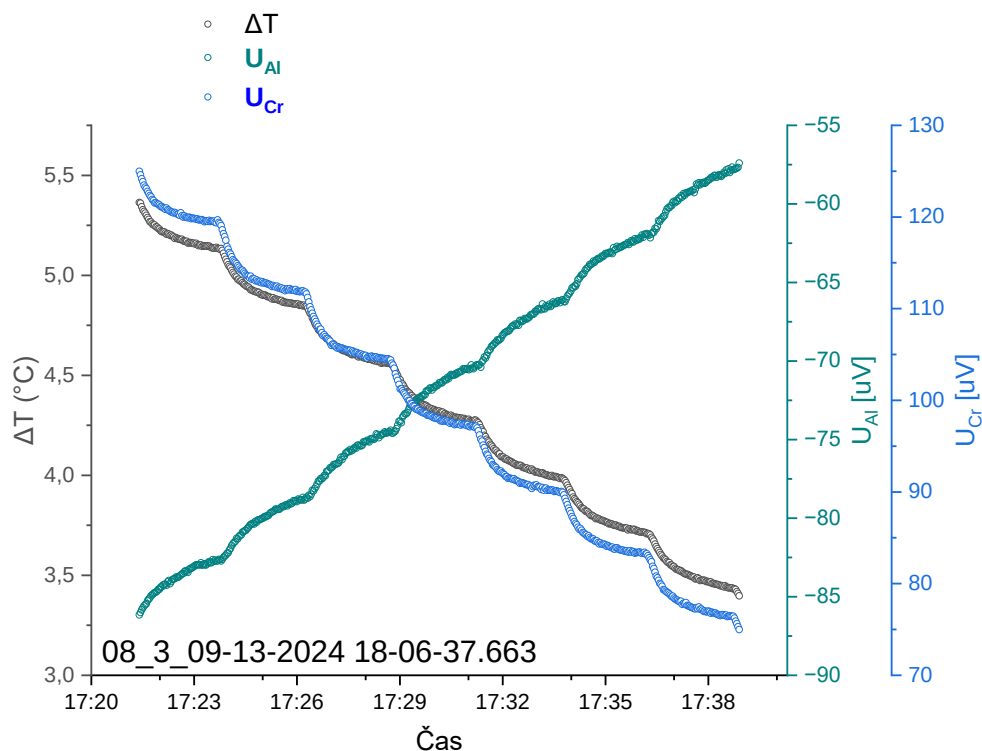
Obr. 5: Schéma měřicího okruhu pro měření Seebeckova koeficientu

Při laboratorním měření TEP byly teploty a rozdíly elektrických potenciálů na povrchu vzorku měřeny pomocí dvou termočlánků typu K. V blízkosti kontaktu jednoho termočlánku byl nalepen plošný rezistor. Průchodem elektrického proudu rezistorem vznikl povrchový teplotní gradient. Teplotní gradient nebyl během měření konstantní, byl kontrolován napájecím proudem rezistoru. Měřený vzorek ležel na měděné podložce, od které byl elektricky odizolován PTFE folií, viz obr. 6.



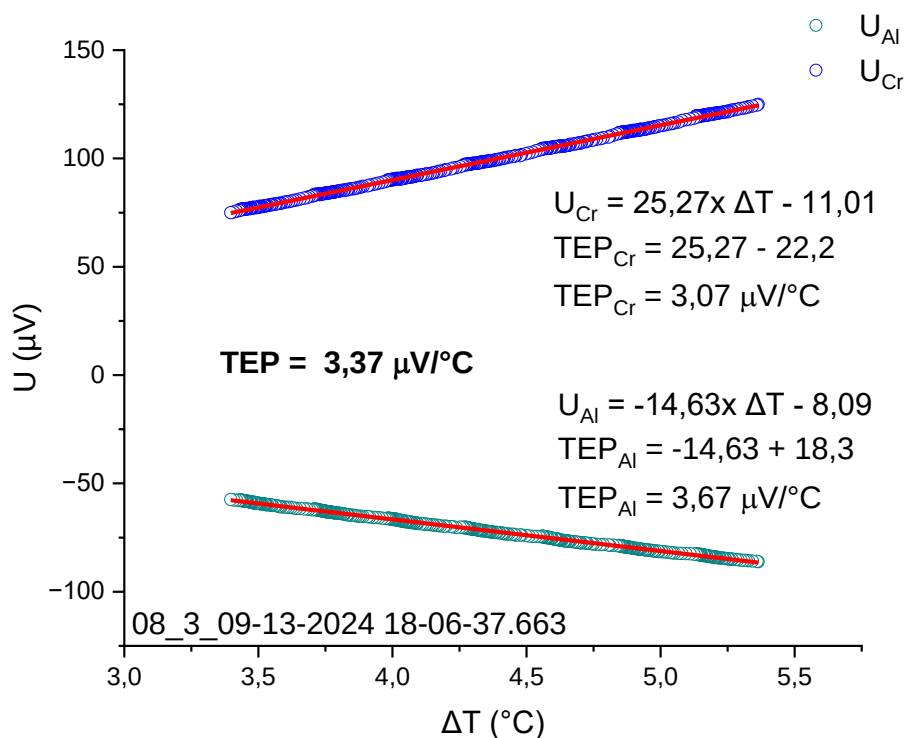
Obr. 6: Reálné provedení měření TEP

V grafu na obr. 7 jsou vyneseny časové průběhy rozdílu teplot mezi měřicími body na povrchu vzorku a odpovídající hodnoty elektrického napětí měřené pomocí kladné (chromelové) a záporné větve (alumelové) termočlánků.



Obr. 7.: Časový průběh teplotního gradientu a generovaných elektrických napětí

Závislost generovaných napětí na teplotním gradientu je v daném teplotním rozsahu lineární (viz obr. 8), TEP článků vzorek-chromel a vzorek-alumel lze získat jako směrnici daných přímk. Za předpokladu, že absolutní hodnoty TEP pro chromel a alumel pro teplotu 25 °C jsou 22,2 $\mu V/^{\circ}C$ resp. 18,3 $\mu V/^{\circ}C$ [2], je absolutní hodnota Seebeckova koeficientu vzorku 3,37 $\mu V/^{\circ}C$.



Obr. 8: Stanovení absolutní hodnoty Seebeckova koeficientu měřeného vzorku

Poděkování

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

Literatura

- [1] ČSN EN ISO 12732 (038140) *Koroze kovů a slitin-Měření elektrochemické potenciokinetické reaktivace s využitím záznamu dvojité smyčky (na základě Číhalovy metody)*. Česká agentura pro standardizaci, 2009.
- [2] *Nondestructive Evaluation: Methods for Characterizing Residual Stress in Metals and Thermal Aging in Cast Austenitic Stainless Steel: Technology Survey for Stress Measurement and NDE for CASS*. 2015, Palo Alto, CA: EPRI: 3002005454.

PROGRAM ŘÍZENÉHO STÁRNUTÍ KOMODITNÍ

AGEING MANAGMENT PROGRAM – ADVANCED APPROACH

Ondřej Plíhal a David Cvešper

ČEZ, a. s.

Abstrakt

V rámci rozvoje řízení stárnutí strojních zařízení pro elektrárny Temelín a Dukovany byl vytvořen nový Program řízení stárnutí (PŘS) – komponentní. Účelem tohoto programu je zaměření se na komponenty, které jsou v bezpečnostní třídě BT1 a BT2 (důležité z hlediska jaderné bezpečnosti) a nebyly dosud řešeny jiným programem řízení stárnutí tak, abychom v souvislosti s prodlužováním životností jaderných zařízení zajistili řízené stárnutí zařízení.

Tento program řízení stárnutí reaguje na potřeby jaderné elektrárny zajistit dlouhodobý provoz, tj. předpoklad 60 let. To znamená, že v rámci programu je řešena problematika stárnutí zařízení z pohledu předpokládaných degradačních mechanismů v horizontu právě 60 let.

Abstract

As part of the development of machinery aging management for the Temelín and Dukovany power plants, a new Ageing Management program (AM program) was created – component. Developer for components classified as Safety Classes BT1 and BT2 (critical for nuclear safety) that are not addressed by other component AM programs.

These components were not included in the life extension process, so for long-term operation beyond 60 years, it is necessary to maintain and consider an extended lifespan for these components.

Původní koncept: řízení stárnutí zařízení JE (bez PŘS – komoditní)

Původní koncept řízení stárnutí strojních zařízení v JE byl nastaven programově pro vybraná zařízení a specifické degradační mechanismy v rámci skupiny Řízení stárnutí – strojní. Zvolený přístup je v souladu s národními i mezinárodními standardy a doporučeními, jejichž realizaci zajišťují zaměstnanci/týmy jednotlivých programů řízení stárnutí.

Nastavení komponentních PŘS:

- PŘS RE (Reaktor),
- PŘS PG (Parogenerátor),
- PŘS HCČ (Hlavní Cirkulační Čerpadlo),
- PŘS KO (Kompenzátor Objemu),
- PŘS potrubí BT1.

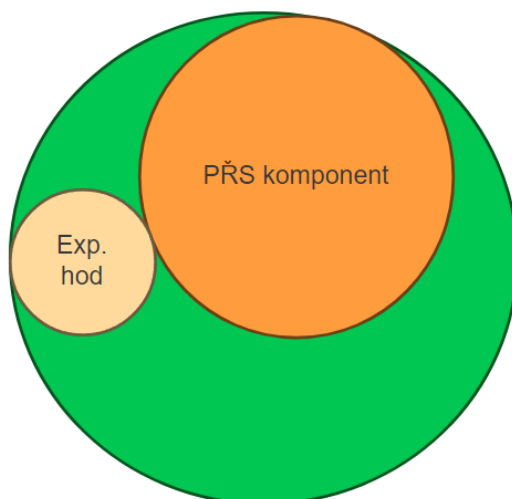
Nastavení specifických PŘS:

- PŘS NCÚ (nizkocyklová únava),
- PŘS FAC (koroze vlivem proudění média),
- PŘS RMSS (riziková místa svarových spojů).

Expertní hodnocení konkrétních zařízení:

- TLAA (analýza stárnutí),
- expertní posudky.

V rámci prodlužování životnosti zařízení a s tím spojených činností vznikly odborné posouzení a expertní hodnocení zabývající se stárnutím zařízení, která nebyla součástí žádného programu řízení stárnutí. Reakcí na tento nedostatek je právě zavedení PŘS – komoditní, který zajistí podporu v řízení stavu těchto zařízení.



Obr. 1: Původní koncept řízení stárnutí JE

Tento koncept se zdál jako nedostatečný, a proto byl vytvořen PŘS komoditní. Tedy hodnocení stárnutí po komoditních skupinách abychom zařadily i komponenty, které nebyly dříve podchyceny.

Nový koncept: řízení stárnutí zařízení JE s PŘS komoditní

Komoditní program řízení stárnutí strojních zařízení doplňuje současné potřeby JE v oblasti řízení tak, aby bylo možné zajistit včasnou reakci ve vazbě na stav jednotlivých zařízení. Množinu těchto zařízení vymezuje bezpečnostní třída BT1 a BT2 (důležité z hlediska jaderné bezpečnosti). Dále je uvažováno rozdělení zařízení do komoditních skupin (např. nádrže, potrubí), a to z důvodu optimalizace rozsahu této rozsáhlé množiny strojních zařízení, která čítá tisíce jednotek. Zmíněné rozdělení usnadní přístup k řešení technických problematik, jelikož zařízení v těchto skupinách mají shodné prvky, jako například materiál, ze kterého jsou vyrobeny nebo konstrukční provedení.

PŘS – komoditní je implementován na 34 technologických systémech, pro které jsou jednotlivá zařízení rozdělena do komoditních skupin (např. potrubí, čerpadla, výměníky, aj.).

Hodnocení PŘS – komoditní sestává z následujících oblastí:

- Expertní hodnocení a odborná posouzení,
- Hodnocení DM (degradačních mechanismů),
- Rozsah údržby,
- Nastavení nápravných opatření ve vazbě na provedené hodnocení.

Expertní hodnocení a odborná posouzení

V rámci hodnocení jednotlivých degradačních mechanismů jsou zpracovávány expertní hodnocení a odborná posouzení, která vstupují do samotných hodnocení. Příkladem může být hodnocení nízkocyklové únavy zařízení, které bylo zajištěno již v rámci dodávky zařízení na JE, avšak v závislosti na době provozu zařízení je potřeba zajistit je prodloužení, tak abych provozovatel disponoval informací o očekávaném vývoji tohoto DM. Tyto dokumenty nazývané TLAA obsahují odborné analýzy predikující vývoj vybraného DM pro předpokládanou dobu provozu zařízení, resp. JE.

Hodnocení DM

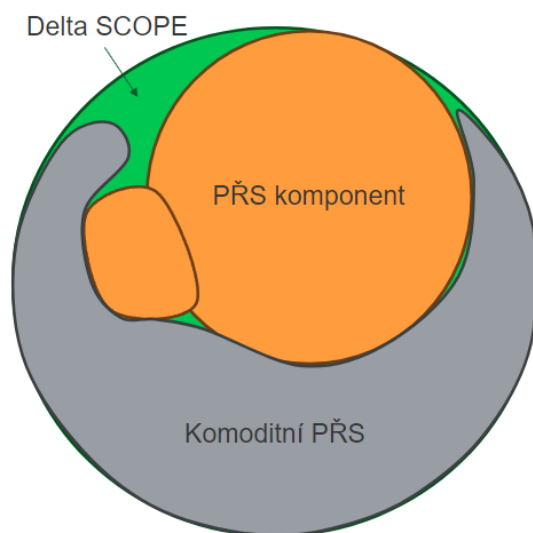
Komoditní PŘS hodnotí DM pro jednotlivé komoditní skupiny, kde vychází jak ze zkušeností mezinárodní praxe, tak i vlastních zkušeností provozovaných JE. Hodnocení posuzuje správnost přiřazení DM, tak i jeho dopad na zařízení, resp. komoditní skupinu. V rámci hodnocení lze definovat zpětnou vazbu ve formě nápravných opatření, viz dále.

Rozsah údržby zařízení

Informace z údržby zařízení budou posuzovány v rámci hodnocení z důvodu zjištění reálného stavu strojních zařízení, tak aby bylo možné posoudit, zda předpokládaný rozvoj degradačních mechanismů je v souladu se zjištěným stavem, respektive nedochází ke zvýšené míře degradace zařízení způsobené očekávaným nebo neočekávaným DM.

Nastavení nápravných opatření

Výsledkem hodnocení PŘS – komoditní je posouzení potřeby realizace nápravných opatření pro minimalizaci projevů stárnutí.



Obr. 2: Nový koncept řízení stárnutí

PŘS – komoditní je v současné době stále ve fázi implementace, a z tohoto důvodu jsou připravována hodnocení obecnějšího charakteru. V souladu s odstupňovaným přístupem předpokládáme, že z prvotního hodnocení vyplynou další oblasti zájmu, kterým bude potřeba věnovat detailnější pozornost tak, abychom zajistili dostatečnou podporu v řízení stárnutí strojních komponent. Kontinuální hodnocení PŘS – komoditní zajistí sběr aktuálních informací o stavu zařízení, které budou reflektovány v jednotlivých hodnoceních. Tímto přístupem přispějeme ke zlepšení bezpečnosti a funkčnosti zařízení v prodlouženém provozu.

Literatura

- [1] BELKO Milan a CVEŠPER David. *Metodika – Program řízeného stárnutí komoditní*. ČEZ, a. s., 2024, ČEZ_ME_1226.

ŽIVOTNOST KOMPONENT DŮLEŽITÝCH PRO PŘECHODNÉ OBDOBÍ A PRO VYŘAZOVÁNÍ

LIFETIME OF COMPONENTS IMPORTANT FOR TRANSITION PERIOD AND FOR DECOMMISSIONING

Filip Randák a František Huptych

ÚJV Řež, a. s., Divize Energoprojekt

Abstrakt

Příspěvek se věnuje vybraným zařízením, která jsou nutná pro přechodné období a pro období vyřazování. Plánovaná délka provozu jaderných elektráren je 60 let. Po uplynutí této doby následuje přechodné období, během kterého jsou jaderné elektrárny připravovány na vyřazování. Ve všech obdobích je důležité udržovat provozuschopnost vybraných zařízení, která jsou klíčová jak pro přechodné období, tak pro období vyřazování. Pokud by tento požadavek nebyl splněn, mohlo by dojít k významnému prodloužení doby vyřazování.

Abstract

The paper deals with selected systems and components that are necessary for the transition period and for the decommissioning. The planned operation life of nuclear power plants is 60 years. After this period, a transitional period follows, during which nuclear power plants are prepared for decommissioning. In all periods, it is important to maintain the operability of selected facilities, which are critical for both the transition period and the decommissioning period. Failure to meet this requirement could result in a significant extension of the decommissioning period.

Legislativní rámec vyřazování

Stanovení legislativního rámce a jeho dodržování je základní a nutný předpoklad pro zajištění bezpečného vyřazování jakéhokoli jaderného zařízení (JZ). Česká legislativa plně akceptuje směrnice Evropského společenství pro atomovou energii (Euratom) a EU v oblasti vyřazování JZ a pracovišť III. a IV. kategorie.

Základní požadavky na vyřazování jsou stanoveny v zákoně č. 263/2016 Sb., atomový zákon, v platném znění (AtZ) a na něj navazující vyhlášce SÚJB č. 377/2016 Sb., o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivními odpadem a o vyřazování pracovišť III. a IV. kategorie, v platném znění a ve vyhlášce SÚJB č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, v platném znění.

Dle AtZ musí držitel povolení povinně plnit své povinnosti, a to až do doby úplného vyřazení, tzn. uvolnění z působnosti AtZ. Povolení je vydáváno SÚJB a je nutné ke všem jednotlivým etapám vyřazování z provozu dle § 9 odst. 1 písm. g) pro jaderné zařízení a dle § 9 odst. 2 písm. d) pro pracoviště III. a IV. kategorie. Povolení k jednotlivým etapám vyřazování je platné po dobu maximálně 10 let, přičemž držitel povolení má za povinnost uchovávat veškerou dokumentaci po dobu 20 let od úplného vyřazení.

V případě, že není požadováno úplné vyřazení z provozu, je žadatel povinen dle § 105 odst. 2 AtZ „určit podmínky dalšího využití území a systémů, konstrukcí nebo komponent, včetně rozsahu a způsobu sledování, měření, hodnocení, ověřování a zaznamenávání veličin a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany a monitorování radiační situace“.

Přechodné období

Na úvod je třeba zmínit, že mezinárodní terminologie v této oblasti není kompatibilní s českou terminologií.

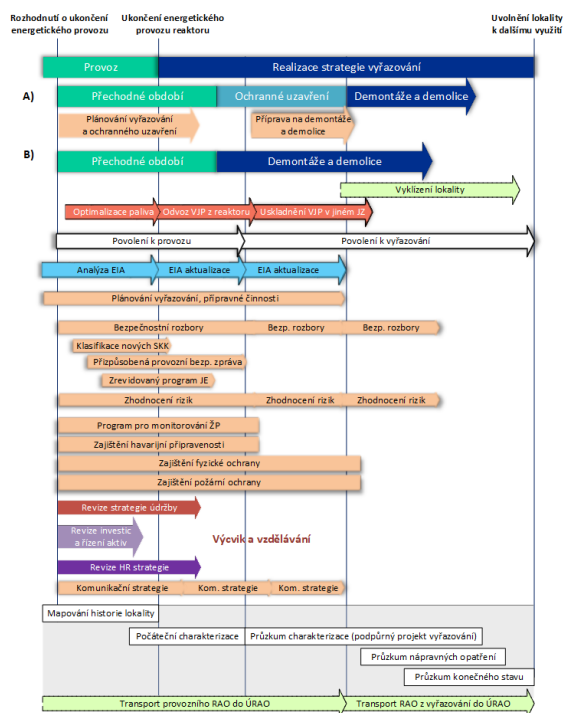
Česká legislativa používá pro potřeby vyřazování následující pojmy:

- Ukončení energetického provozu – stav JZ, kdy dojde k ukončení energetického provozu (výroby elektrické energie) a další výroba není již plánována. Veškeré palivo je následně vyvezeno z aktivní zóny reaktoru do bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva (BSVP).
- Ukončování provozu – období skladování vyhořelého jaderného paliva (VJP) v BSVP na jaderné elektrárně (JE) a jeho vyvezení do jiného JZ.
- Ukončení provozu JE – stav JE, kdy veškeré VJP je převezeno do jiného JZ (např. do skladu VJP).

Mezinárodní dokumenty označují období od začátku plánování poslední vsázky jaderného paliva přes ukončování energetického provozu do zahájení vyřazování JZ za přechodné období. Toto období má za cíl především uvést JZ do stavu vhodného pro vyřazování.

V přechodném období je žádoucí zmapovat činnosti, které je nutné provést, aby byl přechod z provozního stavu do stavu vhodného pro vyřazování co nejefektivnější. Toto období je charakteristické přípravou na následné demontážní a dekontaminační práce, charakterizací a nakládáním s provozními odpady, zpracováním projektů na vyřazení z provozu, zajištěním financování a výběrem zhotovitele. U JZ se v tomto období provádí zejména činnosti spojené s dochlazováním a vyvážením VJP z BSVP. Vyřazování je zahájeno až po vyvezení veškerého VJP mimo JZ. Dále by měly být zohledněny i další aspekty s dlouhodobým vlivem na vyřazování, např. harmonogram snižování počtu zaměstnanců.

Na následujícím obrázku (Obr. 1) jsou vyznačeny hlavní fáze životního cyklu JE a dílčí kroky spojené s úspěšným zvládnutím přechodného období. Případ „A“ představuje postupné vyřazování, tj. s ochranným uzavřením objektů (OUO), „B“ okamžité vyřazování, tj. okamžitá demontáž.



Obr. 1: Hlavní fáze životního cyklu JE a hlavní plánované činnosti pro přechodné období, WANO 2022

Jednou z činností prováděných během přechodného období je charakterizace JZ a zhodnocení historického vlivu provozu JZ na lokalitu s ohledem na budoucí vyřazování z provozu. Důležitým faktorem ovlivňující podobu přechodného období při vyřazování z provozu je budoucí využití lokality. Tento faktor ovlivní strategii údržby jednotlivých zařízení a stavebních

objektů, investiční politiku, plánování lidských zdrojů, samotný plán vyřazování z provozu včetně výběru varianty vyřazování, bezpečnostní analýzy, zhodnocení rizik, vyhodnocení vlivů na životní prostředí (ŽP), eventuální úpravu zóny havarijního plánování, zajištění fyzické ochrany, nakládání s odpady, plán protipožární ochrany, výcvik personálu atp.

Faktory ovlivňující přechodné období ale i strategii vyřazování jsou následující:

- Vlastnictví a zdroje financování – držitel licence je zodpovědný za rozhodnutí o strategii vyřazování a za realizaci plánu vyřazování. V procesu mohou být zainteresováni i jiné strany.
- Národní politika – může ovlivnit termín ukončení výroby elektřiny, okamžité/postupné vyřazování nebo způsoby nakládání s odpady.
- Regulatorní rámec a licencování – k odsouhlasení strategie a získání příslušných povolení je důležité včas zapojit všechny relevantní regulatorní orgány.
- Stav a povaha zařízení – tento faktor bude mít vliv na způsob a časový rámec nakládání s radioaktivními odpady (RAO) a neaktivními materiály.
- Způsoby nakládání s odpady – přímo podmiňují další podobu plánu vyřazování, kritický bod strategického plánování, ovlivňují i skladování, zpracování, úprava a uložení odpadů včetně jejich recyklace a uvolňování z pracoviště.
- Konečný stav – plán vyřazování musí zohlednit, k jakému využití bude oblast po úplném vyřazení z provozu sloužit (např. greenfield nebo brownfield, místo lze využít na nové JZ).
- Kombinace výše uvedených faktorů – koncepce konce palivového cyklu, dostupnost/zprovoznění hlubinného úložiště, dostatečné ukládací kapacity pro uložení RAO.
- Další technické nebo socio-ekonomické faktory.

Strategická rozhodnutí zajišťující přechod mezi provozním stavem a vyřazováním:

- Firemní strategie – určení jednotlivých činností a etap vyřazování a časový harmonogram významných milníků. Je zde možnost předání licence, popř. vlastnictví specializované firmě (dodavatelský model realizace vyřazování), která vyřazení z provozu zrealizuje.
- Personální strategie – odstranění míry nejistoty s ohledem na očekávání a zájmy všech zúčastněných.
- Organizační strategie – rozdělení rolí a zodpovědností.
- Regulatorní postup – plnění požadavků regulatorních orgánů a obdržení potřebných povolení.
- Technická strategie:
 - nakládání s VJP, RAO a dalšími odpady,
 - správa životního cyklu JE,
 - odstavení a ukončení provozu všech nadbytečných, redundantních systémů,
 - modifikace zařízení vedoucí ke zjednodušení demontážních činností a demontáž zařízení za účelem odprodeje již během přechodného období,
 - sanace lokality a celková dekontaminace,
 - charakterizace,
 - úprava zóny havarijního plánování, event. změny ve fyzické ochraně,
 - volba technologií a jejich vývoj.
- Komunikační strategie:
 - Celková strategie komunikace s národními, regionálními a místními zainteresovanými stranami, v jednotlivých případech se bude lišit i způsob komunikace.
 - Zřetelné vysvětlení jednotlivých etap vyřazování a cílů vyřazování všem zainteresovaným stranám.

Při plánování činností v rámci přechodného období je nezbytné, aby byly k dispozici záznamy o skutečném stavu JZ, tzn. musí být k dispozici dokumentace o skutečném provedení, provozní dokumentace, historické provozní záznamy (včetně informací o provozních událostech, jejich hodnocení a posouzení vlivu těchto dopadů na vyřazování, zejména informace o možné kontaminaci). Dále je nutné, aby byla k dispozici informace o licenční dokumentaci, organizační struktuře, bezpečnostní dokumentaci, nakládání s odpady apod. Tyto činnosti vyžadují důkladné plánování a pochopení souvislostí.

K tomuto se vážou požadavky na systémy a komponenty (SK) potřebné pro přípravné období a vyřazování, na které je potřeba brát zřetel už za provozu JZ. Tyto SK je možné rozdělit do následujících kategorií:

- SK potřebné během přechodného období a případně i během vyřazování (např. manipulační zařízení),
- SK vyžadující úpravu nebo vylepšení, buď aby splnily požadavky vybrané strategie vyřazování, nebo umožnily instalaci jednodušších systémů (např. vzduchotechnika, radiální monitoring),
- SK potřebné během přechodného období, nutné ke splnění některých operací a vyžadující zvýšenou odolnost (např. zařízení pro manipulaci s VJP, odvod zbytkového tepla z BSVP),
- SK potřebné během energetického provozu JZ, které jsou umístěny ve stavebních objektech, jež mají být vyřazeny z provozu, ale jsou sdíleny (např. zajišťují dodávky tepla, elektrické energie, médií atd.) se zařízeními či objekty, která nadále zůstávají v provozu po ukončení energetického provozu JZ,
- SK nepotřebné během přechodného období,
- nové SK usnadňující proces nakládání s odpady a vyřazení z provozu JZ.

Strategie životnosti SK v JZ by měla zohledňovat následující aspekty:

- SK musí vždy plnit požadavky dané bezpečnostní dokumentací. Management životního cyklu JE se z velké části odvíjí od stávající bezpečnostní dokumentace a strategie nakládání s VJP.
- Po stanovení termínu ukončení energetického provozu JZ je možné během posledních odstávek JZ postupovat konzervativně (dlouhodobě plánovat životnost a případnou náhradu jednotlivých SK), vzhledem k blížícímu se ukončení energetického provozu.
- Přechodné období je doba zvýšeného rizika vzniku nejrůznějších komplikací, změn v JE (personální, provozní apod.) a nestandardních operací, proto by mělo dojít k přijetí dalších opatření k udržení stabilního stavu a kontroly nad JZ, využijí se vhodné metody řízení životního cyklu výrobku (Product Lifecycle Management).
- Vzhledem k měnícím se podmínkám a stárnutí SK může docházet k rychlejší degradaci materiálů. Při nízkých teplotách mohou být kladeny vyšší potřeby na vytápění, postupné vyřazování by mělo více počítat s opotřebením a stárnutím systémů v souvislosti s dosud neodstraněnými SK.
- Některé demontážní činnosti lze provést v předstihu během přechodného období, převážně ty neovlivňující bezpečnost JE. Jedná se zejména o demontáž zařízení za účelem odprodeje a znovuvyužití.

Vyřazování z provozu

Dle IAEA by vyřazování JZ z provozu mělo:

- poskytovat ochranu současné a budoucím generacím obyvatelstva vč. ochrany ŽP,
- zahrnovat dlouhodobý závazek řádného spravování lokality JZ a řádného nakládání se vznikajícími odpady,
- zajistit efektivní využívání zdrojů,

- poskytovat otevřené a transparentní interakce se zainteresovanými stranami.

Další důležité principy zahrnují:

- Veřejnost by měla mít možnost podílet se na rozhodování, pokud je to relevantní.
- Potřeby současné generace musí být uspokojeny, aniž by byly ohroženy potřeby budoucích generací.

IAEA definovala strategie vyřazení z provozu. Definice jednotlivých způsobů vyřazování byly přijaty na mezinárodní úrovni. Základní strategie vyřazování podle IAEA (IAEA 2005) jsou následující:

- Okamžitá demontáž

Jedná se o strategii, která umožňuje vyjmout zařízení z kontroly regulátora relativně brzy po ukončení energetického provozu. Po ukončení provozu může započít dekontaminace a demontáž, a to do několika měsíců od ukončení dle zařízení. Po ukončení vyřazování je zařízení vyjmuto z působnosti dozorového orgánu a lokalita je uvolněna pro další využití. V případě JE se jedná o období 10-20 let.

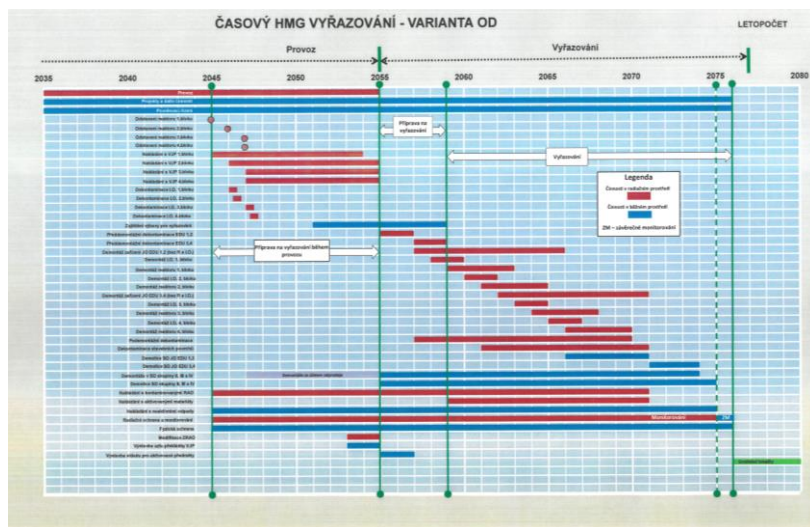
- Odložená demontáž

Tato varianta je specifická především v delším časovém období vyřazování (40-60 let). Po vyvezení veškerého VJP z BSVP je následně zařízení uvedeno do bezpečného stavu (ochranné uzavření), během kterého dochází ke snížení aktivity v důsledku radioaktivního rozpadu. Po skončení ochranného uzavření mohou být zahájeny dekontaminační a demontážní práce.

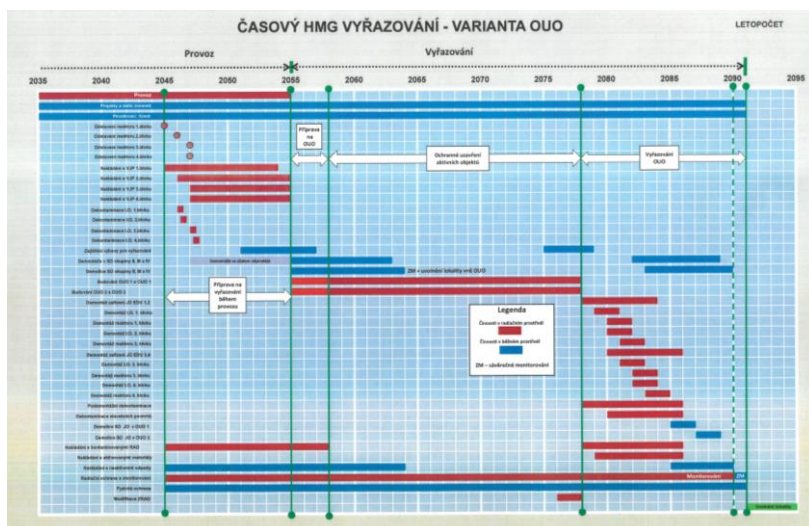
Každá ze strategií má své výhody a nevýhody. Výběr varianty je běžně dán legislativním rámcem daného státu. Mezi hlavní faktory ovlivňující výběr varianty vyřazování patří:

- legislativní požadavky a požadavky regulátora,
- národní strategie nakládání s RAO a VJP,
- zájmy vlastníka zařízení vč. plánovaného využití lokality v budoucnosti,
- dostupnost technologií využitelných při vyřazování, dekontaminaci, sociální aspekty, znovu zaměstnatelnost,
- požadavky na radiační ochranu,
- náklady na vyřazování z provozu,
- příp. další (podle podmínek specifických pro dané zařízení).

Na následujících obrázcích (Obr. 2 a Obr. 3) jsou harmonogramy pro okamžité vyřazování (OD) a ochranné uzavření objektů (OUO) pro JE Dukovany (EDU).



Obr. 2: Časový harmonogram vyřazování EDU varianta OD



Obr. 3: Časový harmonogram vyřazování EDU varianta OUO

Závěr

Životnost vybraných SK je velmi důležitým aspektem přechodného období a vyřazování. Některé komponenty musí fungovat v případě OD i 20 let od ukončení energetického provozu, v případě OUO i 40 let od ukončení energetického provozu. Z tohoto důvodu je nutné zachovávat tyto SK v dobrém technickém stavu již za provozu JE.

Literatura

- [1] PODLAHA, Josef a kol.: *Kritická analýza strategií vyřazování jaderných zařízení z provozu*. Řež, 2024, souhrnná výzkumná zpráva, TK04010169.
- [2] HUPTYCH, František a kol. *Vyřazování z provozu JE Dukovany – Plán vyřazování z provozu JE Dukovany*, Praha, 2022, studie.
- [3] *Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, v platném znění.*

INSPEKCE BEM™ NA POTRUBÍ CHLADÍCÍ VODY V ETE

BEM™ INSPECTION ON COOLING WATER STRUCTURE AT ETE

Vojtěch Kříž

Rock Solid Group Pty Ltd

Abstrakt

Tento příspěvek se zaměřuje na prevenci a diagnostiku citlivých zařízení provozu potrubní kritické energetické infrastruktury. Článek předkládá příklad pilotního projektu provedení plošné NDT inspekce pomocí BEM™ a inovativní postupy při vyhodnocování inspekčních dat a jejich implementaci pro stanovení životnosti klíčových zařízení, konstrukcí a komponent.

Abstract

This paper focuses on prevention and diagnosis of sensitive operational equipment as part of critical energy infrastructure. It presents an example of a non-standard NDT inspection pilot project using BEM™ and an innovative procedure for evaluating inspection data, its implementation in determining the remaining service life of key equipment, structures and components.

Úvod

Stanovení stavu vedení chladicí vody je jednou z nezbytných preventivních operací k zajištění efektivního a bezpečného provozu ETE. Hlavní potrubní systémy chladicí vody (CHV) s ohledem na poměrně značné nominální tloušťky stěny (10 mm+), při průměrech od DN800 do DN1600, se již přes 30 let těší dobré spolehlivosti.

Včasné ověření obecné zbytkové tloušťky stěny a nutnost informace o možných indikacích je v dlouhodobém zájmu provozovatele a stává se stále aktuálnější. Posouzení stavu systému CHV bylo doposud prováděno uceleným systémem statistických metod založených především na cíleném bodovém ultrazvukovém měření (UT).

Použití současných metod pro inspekci dlouhých vzdáleností a hromadný sběr dat, které jsou s úspěchem nasazovány na dálkovodech plynu, zde lze jen těžko využít. Hlavní diskvalifikační faktor pro užití plošného ultrazvukového měření z vnější strany potrubí je značná variace odrazové stěny z důvodu korozních depozitů, nehomogenita přilehlé stěny a dodatečná tloušťka ochranného nátěru.

Oba výše zmiňované nedostatky, tj. roztroušenost měření a principiální nedostatečnost metody jsou vyřešeny nasazením technologie Broadband Electro-Magnetic (BEM™) na potrubích CHV. Možnost interpretace vzájemně vázaných datových bodů umožňuje inovativní přístup k vyhodnocení stavu potrubní stěny.

Záměr příspěvku

- Vzhled do programu projektu, jež je nyní ve finální fázi, v tomto okamžiku spočívající v referenčním měření a kompilaci závěrečných výsledků.
- Pohled na vyhodnocení NDT a odlišnost v přístupu stanovení výsledků z rozsáhlých datových celků jako zdroje pro určení životnosti měřeného objektů.
- Upozornění na slabiny obecně používaných vzorců pro výpočet životnosti (RSL, Remaining Service Life) konstrukcí a komponentů nejen v JE.

Předmět NDT inspekce

Na základě stanovení proveditelnosti a výsledků z pilotního měření patentovanou technologií BEM™ na systémech CHV v ETE v letech 2022 a 2023, byla firma Rock Solid Group Pty Ltd (RSG) pověřena zadavatelem provést NDT kontrolu – měření metodou BEM™ na vybraných úsecích potrubí CHV. Firma RSG v současnosti realizuje projekt BEM™ inspekce pro vyhodnocení stavu stěny, interpretaci její zbytkové tloušťky a tloušťkových trendů v oblasti

měření. RSG také provádí doplňkovou vizuální prohlídku systému a referenční sběr UT dat na určených lokalitách potrubí CHV.

Metoda NDT inspekce and technologie

Technologie BEMTM je unikátní pokročilá elektromagnetická NDT metoda odvozená od metody vířivých proudů (PEC), jindy také nazývaná mPEC. Její předností je možnost plošného snímání (100% pokrytí povrchu) zajištěného bezkontaktním sběrem dat. Testování je prováděno podél jednoznačně koordinovaného rastru o velikosti 25 mm, jež umožňuje opakovatelnost měření v delším časovém odstupu a spolehlivou detekci indikací pro následné ověření referenční technologií. BEMTM nabízí také možnost detekce druhu materiálu a jeho metalurgických odchylek a nástroj k stanovení přítomnosti bludných proudů urychlujících korozi materiálu. Technologie BEMTM již po 35 let napomáhá v oblasti řízení stárnutí a bezpečnému dlouhodobému provozu energetických zařízení a přenosových tras s těžištěm trhu v zámoří. Rock Solid je vlastníkem a držitelem patentů BEMTM a jedná se o první rozsáhlé nasazení této technologie plošného posuzování stavu metalických struktur v ČR.

NDT měření a vyhodnocení BEMTM datových souborů

Od jara tohoto roku probíhalo měření BEMTM a doplňkové NDT inspekce při vybraných komponentách potrubí CHV.



Obr. 1: Lokalita vlezů do potrubí a kompenzátoru potrubí

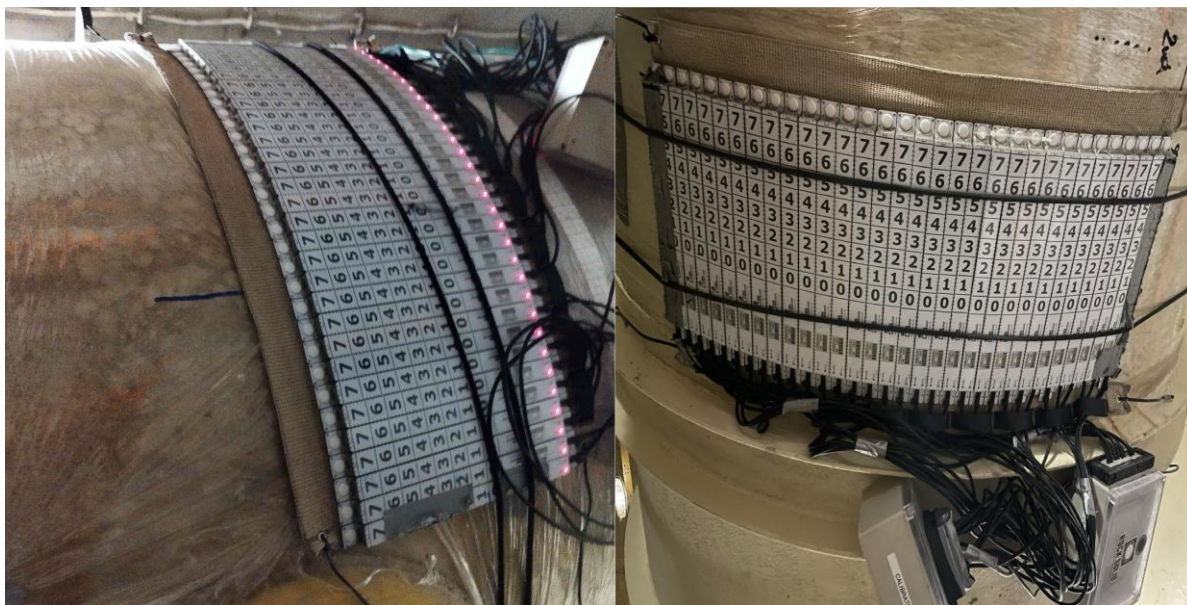
Bylo stanoveno 25 míst plošného měření BEMTM, tj. všechny oblasti vlezů do potrubí a okolí kompenzátorů na potrubí sání a vratky chladicí vody.

Tab. 1: Výčet zvolených lokalit pro BEMTM inspekci

Průměr potrubí (mm)	Součet všech lokalit	Počet lokalit vlezů do potrubí	Počet lokalit kompenzátorů	Počet lokalit potrubí sání	Počet lokalit potrubí vratky
820	2	2	0	0	2
1020	3	2	1	3	0
1220	6	3	3	2	4
1420	7	5	2	0	7
1620	7	6	1	7	0
Součet lokalit dle typu a trasy	25	18	7	12	13

Použité zařízení nCOR bylo osazeno kobercem 32 antén o velikosti sensoru 25 mm, v němž každá anténa disponuje 8 individuálně řízenými sensory. Toto senzorové pole produkující 256

individuálních datových BEM™ záznamů se stává koordinační jednotkou při pohybu po obvodu potrubí, jež u největšího průměru reprezentuje vzdálenost 5 m za jeden okruh.

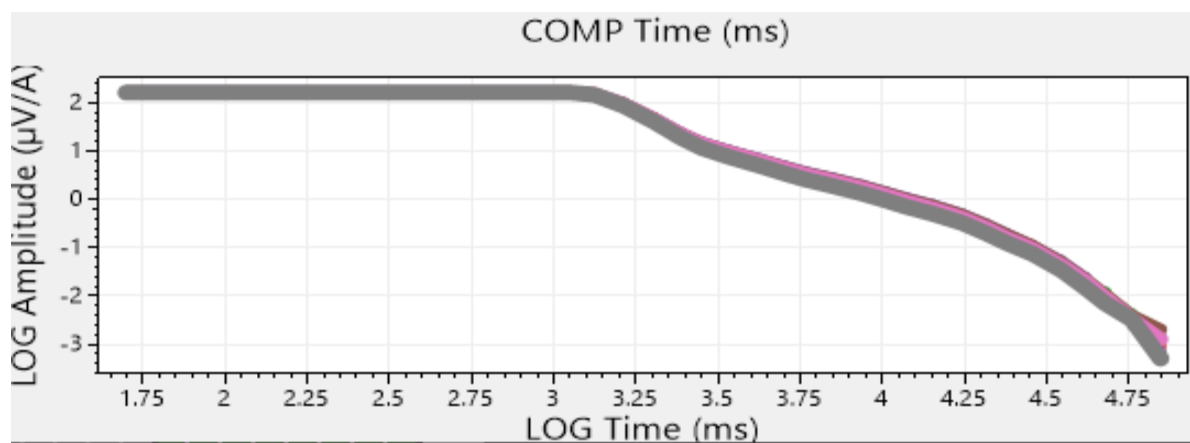


Obr. 2: Sběr dat z pozice koruny a spodku potrubí DN1600 v lokalitě 2MH10

Během tohoto projektu byl proveden screening kompletní plochy stěny potrubí v okolí diskutovaných komponent. Na potrubí bylo nashromážděno přes 250 000 datových bodů.

Předmětem vyhodnocení je stanovení zbytkové tloušťky a stavu potrubní stěny přímých sekcí s důrazem na trendy změn tloušťky ve sledovaných sekcích. Data byla zpracována do plošných map profilu potrubní stěny s interpretací zdánlivé zbytkové tloušťky metalické stěny AWT (Apparent Wall Thickness) a mapy znázorňující lokalizované oblasti snížení tloušťky či indikace možných anomálií v potrubní stěně DLA (Discrete and Localized Anomaly), viz Obr. 4. Svary a teplotně ovlivněná zóna v jejich okolí HAZ (Heat Affected Zone) byly vyňaty ze závěrečné statistiky zbytkové tloušťky a mohou být interferovány samostatně relativním posouzením stability signálu podél jejich linie, toto ovšem není předmětem tohoto projektu.

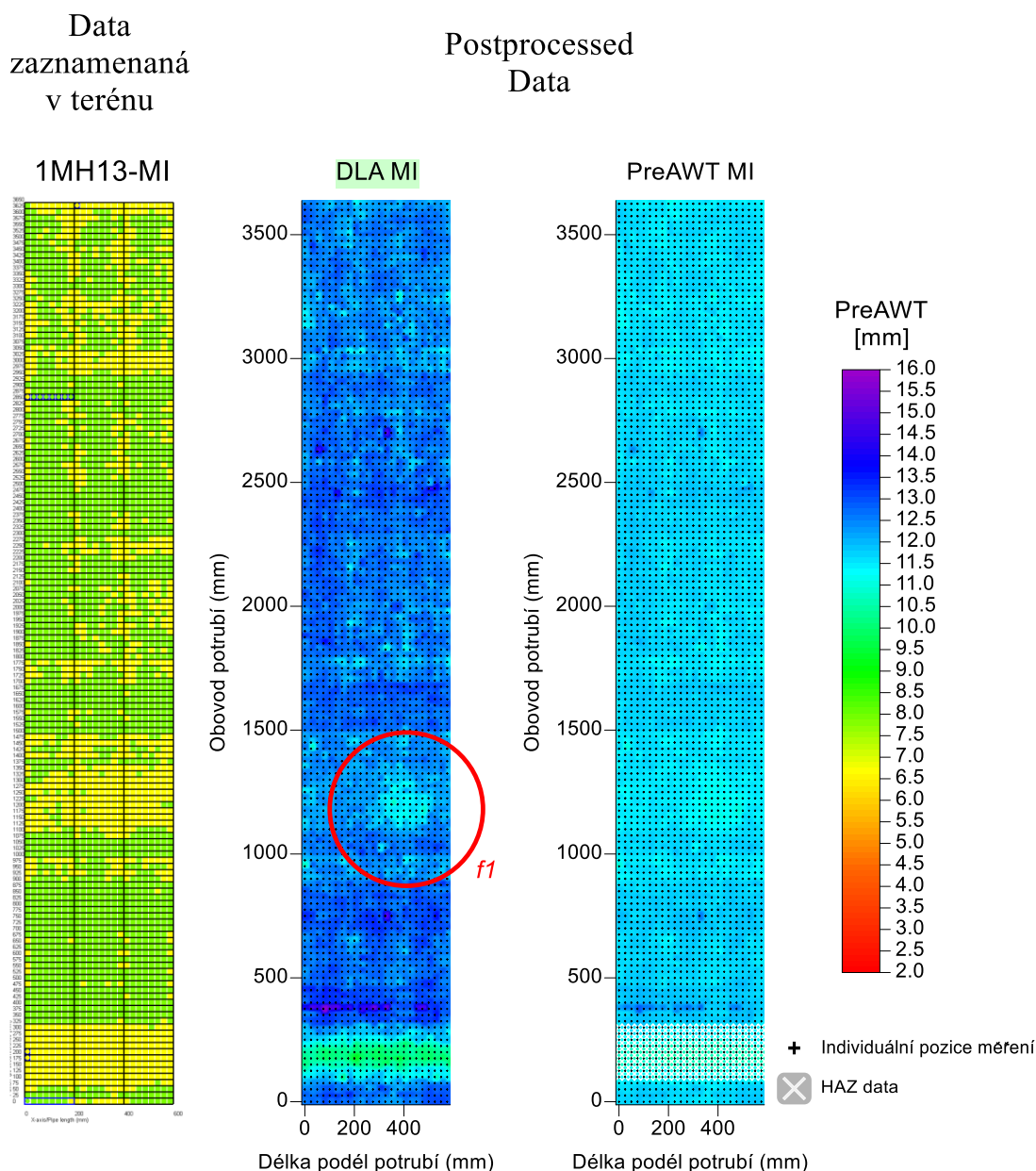
Úroveň a druh rušení je posuzován pomocí příslušné funkce NLM (Noise Level Monitor) softwaru MetConNG a dokládá, že naměřená data vykazují velmi nízkou úroveň náhodného rušení po celou dobu měření ve všech lokalitách. Je usuzováno, že vliv nežádoucích bludných proudů (stray currents) ve sledovaném celku je velmi nízký.



Obr. 3: Záznam NLM z měření v lokalitě vlezu 1MH13 s nízkou úrovní rušení

V současné době spolupracuje firma RSG se se zadavatelem na škálování závažnosti indikací f (finding) a lokalizovaných úbytků obecné stěny, pro stanovení míst pro dodatečné měření

anténou menší velikosti sensoru a ověření nálezu referenční technologií na jiném fyzikálním principu, například UT.



Obr. 4: Internovaná BEMTM data z lokality vlezu 1MH13; terénní záznam v jednotkách intenzity BEMTM signálu – vlevo, zpracovaná data do mapy indikací a obecné zbytkové tloušťky AWT. Červeně je zvýrazněno místo pravděpodobné rozvíjející se interní koroze.

Interpretace zbytkové stěny potrubí pro výpočet životnosti k zajištění strukturální pevnosti

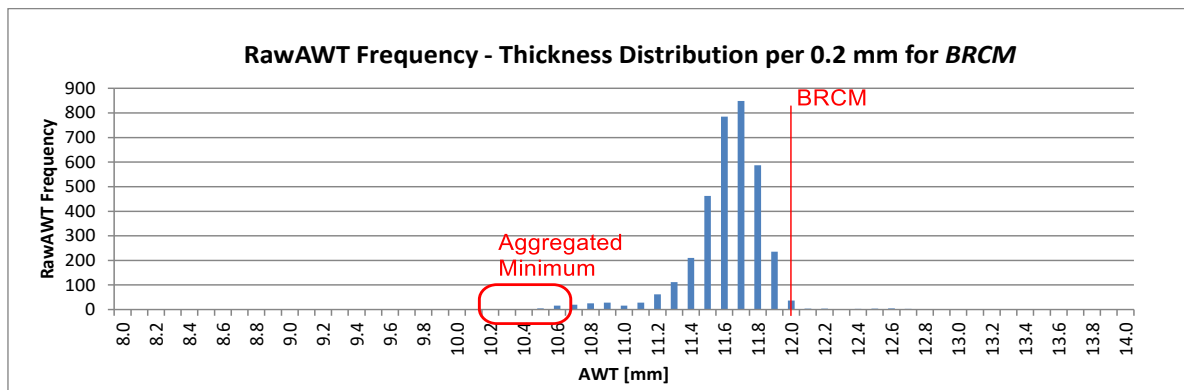
Historické a v současnosti užívané konvenční statistické přístupy pro stanovení životnosti (RSL) jsou omezeny nedostatečnou četností vstupních dat. RSL je obecně prováděna pouze z jedné individuální minimální hodnoty a z často nerelevantní informace o původní nominální tloušťce. Tato predikční metoda není vhodná především pro strukturu s mohutností, jakou reprezentují potrubí CHV.

Standardní výpočet Zbytkové Životnosti (ZZ) pomocí RSL kalkulace se stává nedostatečný:

$$\text{Zbytková Životnost} = \frac{[(T_{\min}) - T_p]}{\text{korozní rychlost}} \quad (1)$$

$T_{\min}$ minimální naměřená tloušťka, T_p požadovaná tloušťka nezbytná pro zajištění typického tlaku v systému, $k_{\text{korozní_rychlost}}$ faktor úbytku stěny v čase.

Technika plošného sběru provázaných dat ovšem umožňuje použití mnohem efektivnějšího způsobu pro výpočet ZZ. Z dodaných dat lze stanovit solidní ekvivalent původní nominální tloušťky stěny (NTS), nazývaný Best RSG Calibration Match (BRCM), jež je stanoven z kalibrovaných naměřených dat jako hodnota reprezentující NTS v době uložení potrubí. Po 30 letech provozu tato hodnota v našem případě stále reprezentuje strukturálně zdravou stěnu – přitom se nutně nemusí jednat o individuální nejnížší hodnotu jako u klasické metody.



Obr. 5: Výčet četnosti tloušťky (AWT) pro lokalitu 1MH13-MI s indikovanou hodnotou BRCM

Podobně jako pro horní konec rozdělení četností nemusíme nutně určovat jen individuální minimální hodnotu z magnitudy důlků, ale lze stanovit agregovanou minimální hodnotu (Aggregated Minimum), jež reprezentuje souhrn plošně oddělených minimálních hodnot. Tato veličina mnohem lépe určuje pevnostní vlastnosti celku, kdy individuální defekty mohou být, u nízkotlakých potrubí, jakými jsou systémy CHV, samostatně zajištěny lokální opravou. Třetím parametrem, jež nelze stanovit/detekovat individuálním sběrem dat, je identifikace lokalizovaných oblastí snížení tloušťky způsobených interní korozi nebo degradací stěny pod ochranným nátěrem. Tak, jak je patrné z Obr. 4, plošná metoda sběru dat, jako je BEMTM, dokáže identifikovat takové oblasti, ať již grafickou interpretací nebo matematickým algoritmem.

Závěrem

Je třeba akceptovat, že komplementace nových a původních přístupů v predikci životnosti je nezbytným prvkem prevence moderního energetického sektoru s ohledem na udržitelnost a konkurenceschopnost. Toto potvrzují i výstupy z projektu nasazení technologie BEMTM.

VYSOKOHUSTOTNÍ PALIVA PRO JADERNÉ REAKTORY

HIGH DENSITY FUELS FOR NUCLEAR REACTORS

Petr Šárek ^{a), b)}, Jakub Krejčí ^{a)}, Tomáš Chmela ^{a)} a Jitka Kabátová ^{a)}

^{a)} UJP Praha a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha 5 - Zbraslav

^{b)} Ústav materiálového inženýrství FS ČVUT v Praze, Karlovo náměstí 13, Praha 2

Abstrakt

Vysokohustotní paliva spadají do kategorie tzv. ATF (accident tolerant fuels). Oproti standardnímu keramickému UO_2 mají vysokohustotní paliva vyšší obsah uranu a řádově vyšší tepelnou vodivost. Zvýšení obsahu štěpného materiálu umožňuje dosažení lepší neutronové bilance a vyššího vyhoření. Vyšší tepelná vodivost napomáhá k vyrovnání teplotního gradientu po průřezu palivového proutku za provozu, zlepšení vlastností během přechodových procesů a poklesu volných plynných produktů štěpení. Tento příspěvek se zabývá přípravou vzorků z kovového uranu, plněním palivových proutků a jejich kvalitativním i kvantitativním hodnocením.

Abstract

High density fuels fall into the ATF (accident tolerant fuels) category. When compared to standard ceramic UO_2 , high density fuels offer a higher uranium content and significantly higher thermal conductivity. An increase in fissile material content allows for achieving a better neutron balance and higher burn-up. Higher thermal conductivity helps in equalising the temperature gradient across the fuel rod in operation, improves performance during transient processes and decreases the release of gaseous fission products. This contribution is focused on the preparation of metallic uranium samples, the filling of fuel rods and their qualitative and quantitative evaluation.

Úvod

V posledních letech se klade stále větší důraz na zvyšování bezpečnosti a účinnosti všech energetických celků. Havarijní stavy jaderných elektráren se jeví jako obzvláště nebezpečné, neboť mohou v extrémních případech vést až k uvolnění ionizujícího záření a úniku radioaktivního materiálu do okolního prostředí. Ke zvyšování provozní bezpečnosti lze přistupovat dvěma základními přístupy. Prvním je snižování rizika vzniku havárie, druhým pak zvyšování odolnosti a tolerance systémů (především palivových) vůči haváriím. Do druhé skupiny spadají paliva odolná vůči haváriím (accident tolerant fuels, dále jen ATF), která ve srovnání s doposud užívanými palivovými systémy vykazují vyšší provozuschopnost během těžkých havárií.

Jeden z konceptů ATF jsou paliva s vysokou hustotou, jejichž principem je nahrazení paliva v podobě UO_2 pelet materiálem s vyšší relativní uranovou hustotou. Podle chemického složení je možné vysokohustotní paliva rozdělit do následujících skupin:

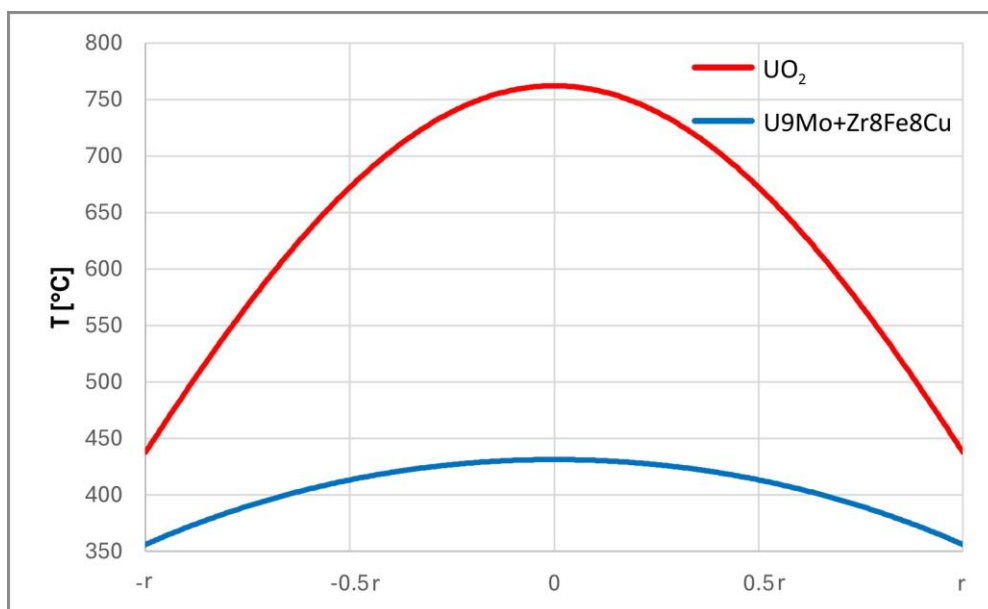
- Kovová (U-Mo, U-Zr, ...),
- Nitridová (báze UN),
- Karbidová (báze UC),
- Křemíková (U_3Si_2 , USi_2).

Porovnání vlastností kovového uranu a UO_2

V dnešních jaderných reaktorech jsou nejčastěji používána paliva ve formě slinovaných pelet z UO_2 . Teoretická hustota UO_2 činí $10,97 \text{ g/cm}^3$, skutečná hustota keramických pelet je však vlivem přítomnosti porozity a pojiv nižší (obvykle okolo $10,5 \text{ g/cm}^3$) [1]. Vzhledem k tomu, že pouze 88 % hmotnosti UO_2 tvoří čistý uran a geometrie slinovaných pelet nezaplňuje celý objem palivové tyče, je uranová hustota keramických paliv obvykle nižší než 9 gU/cm^3 .

Výhodou paliv na bázi kovového uranu je jejich vyšší hustota oproti konvenčnímu UO_2 (čistý uran má hustotu $19,1 \text{ g/cm}^3$). Jako výhodné se jeví používat slitiny uranu s prvky stabilizující fází γ s mřížkou BCC zejména pro jejich nižší tendenci k nárustu objemu s rostoucím vyhořením. Pro umožnění objemových změn a úniku plynných produktů, které vznikají v procesu štěpení, není možné kovová paliva používat ve formě monolitických pelet. Možným řešením je kombinace disperzních částic paliva a kovové matrice s cíleným výskytem pórů umožňující kompenzaci objemových změn.

K vyšší havarijní bezpečnosti vysokohustotních paliv přispívá především jejich relativně vysoká tepelná vodivost [2], která pomáhá vyrovnat teplotní gradient po průřezu palivového proutku a tím snížit množství tepelné energie akumulované v palivovém souboru za provozu. Nižší teplota paliva rovněž zpomaluje uvolňování volných plynných produktů štěpení a snižuje jejich tlak uvnitř palivové tyče. Z výpočtetně stanovených teplotních profilů na obr. 1 (lineární výkon 16 kW/m , průměr pelety $7,57 \text{ mm}$ a vnitřní průměr pokrytí $7,95 \text{ mm}$) byla zjištěna pro peletu UO_2 maximální teplota v ose proutku $762,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a pro disperzní palivo na bázi U9Mo s matricí na bázi Zr8Fe8Cu pouze $431,4 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 1: Teplotní profily palivového proutku pro UO_2 a disperzní U9Mo

Nejvýznamnějším rizikem spojeným s provozem paliv na bázi kovového uranu je jeho vysoká reaktivita s chladicím médiem. V případě porušení pokrytí a průniku vody do palivové tyče začne docházet k rychlému rozpouštění uranu, což vede k uvolňování radioaktivních látek do chladicího média a následné kontaminaci primárního okruhu jaderného reaktoru.

Příprava vzorků

Pro simulaci paliv s vysokou hustotou byly připraveny drobné odlitky z čistého uranu, U9Mo a U4Si . K výrobě byl použit ochuzený uran, který je pro vývoj simulátorů paliv s vysokou hustotou postačující. Pro přípravu jednoho typu vzorku byl použit čistý uran, z kterého byly vyrobeny drobné nepravidelné segmenty o objemu odpovídajícímu kuličkám o průměru $2,5 \pm 0,2 \text{ mm}$ (viz obr. 2). Pro přípravu druhého typu vzorku byly použity wolframové náhražky uranových kuliček o průměru 2 mm , jež simulují optimální geometrii segmentů paliva (viz obr. 2).

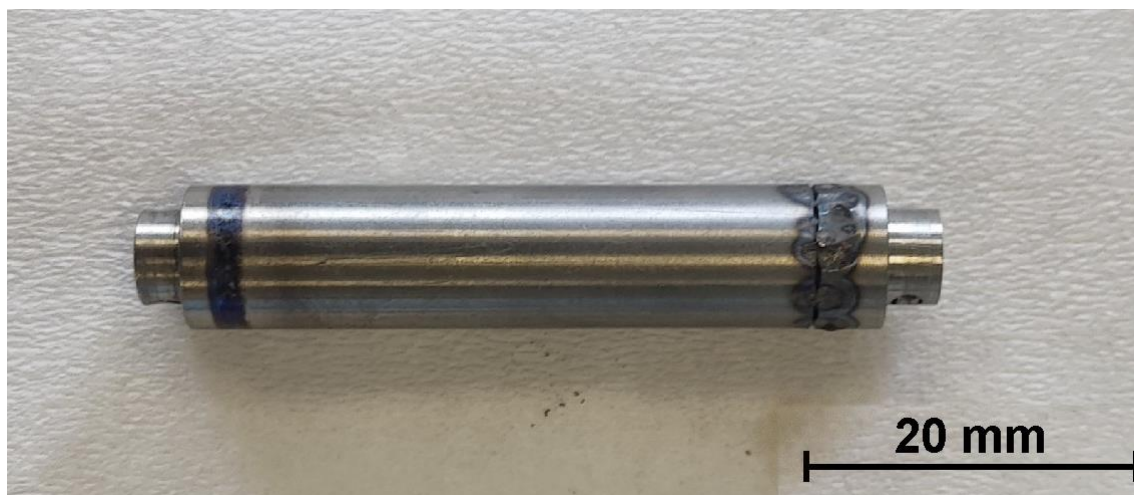


Obr. 2: Segmenty uranu (vlevo) a wolframové kuličky (vpravo)

Jako matrice byla zvolena nízkotavitelná zirkonová slitina Zr8Fe8Cu s teplotou tání přibližně $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Odlitek s požadovaným složením o rozměrech $130 \times 35 \times 10\text{ mm}$ byl připraven z čistých kovů v obloukové peci. Z odlitku byly obrobena válečky pro výrobu prášku metodou ultrazvukové atomizace.

Samotná příprava simulovaných vzorků disperzního paliva probíhala v rukavicovém boxu s inertní argonovou atmosférou o čistotě 99,996 %. Příprava spočívala v plnění palivového pokrytí Zr1Nb o vnějším průměru 9,1 mm a vnitřním průměru 7,95 mm uranovými segmenty (dále vzorek HDF-U-1), nebo wolframovými kuličkami (dále HDF-W-2). Vzorky byly po naplnění palivovými segmenty doplněny atomizovanou matricí.

Po naplnění pokrytí byly vzorky uzavřeny zátkou a po vytažení z prostředí ochranné atmosféry bezprostředně zavařeny, aby bylo zabráněno nežádoucí oxidaci během tepelného zpracování (viz obr. 3).



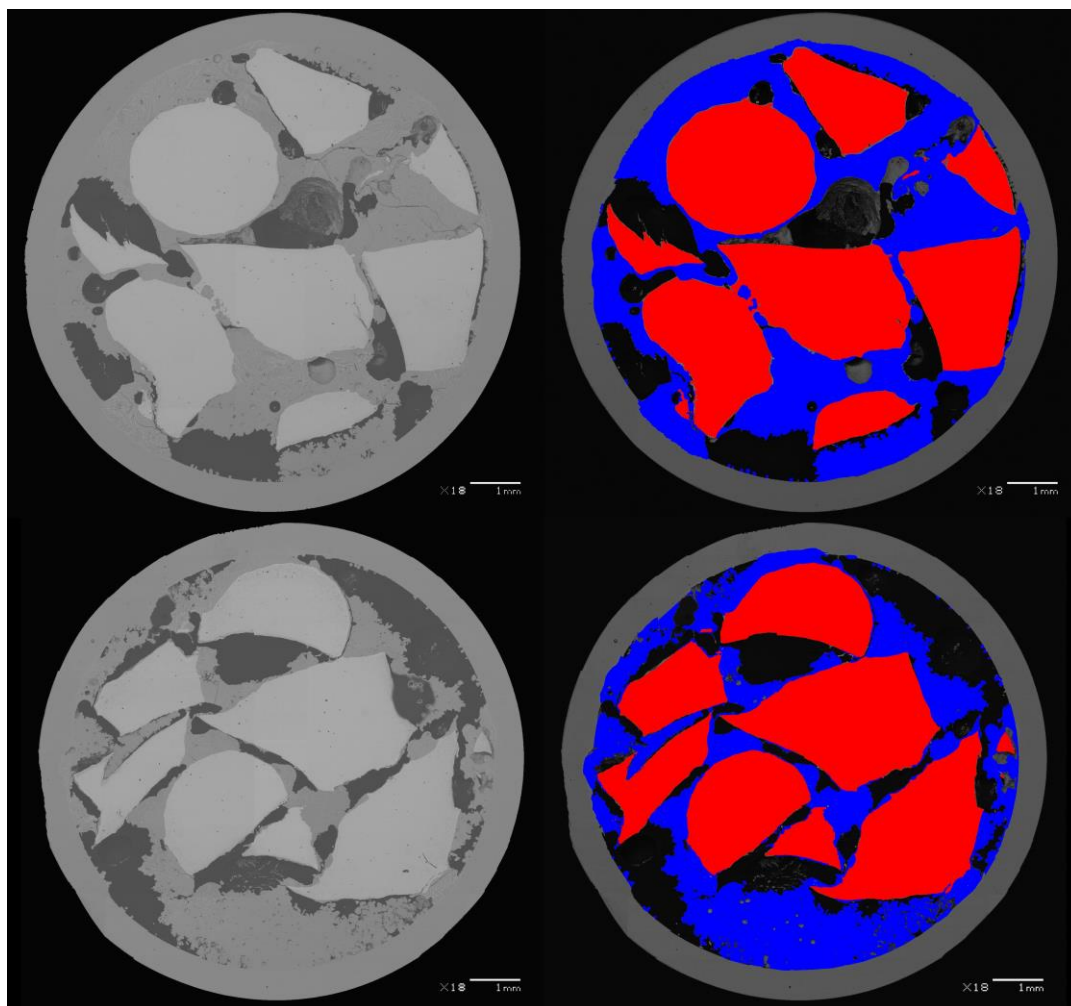
Obr. 3: Simulovaný vzorek paliva s vysokou hustotou po plnění a zavaření

Naplněné a zavařené vzorky byly následně podrobeny procesu kapilární impregnace spočívající v ohřevu vzorků na teplotu $905\text{--}910\text{ }^{\circ}\text{C}$ (přibližně $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad teplotu tání matrice) s výdrží na teplotě alespoň 5 min. Během uvedeného tepelného zpracování matrice nejprve taje a následně vzlíná po stěnách pokrytí a palivových segmentech, čímž je zajištěno nejen mechanické spojení segmentů a pokrytí a zároveň efektivní odvod tepla z paliva. Takto tepelně zpracované vzorky byly rozřezány pro přípravu příčných metalografických výbrusů pro kvantitativní a kvalitativní hodnocení.

Analýza vzorků

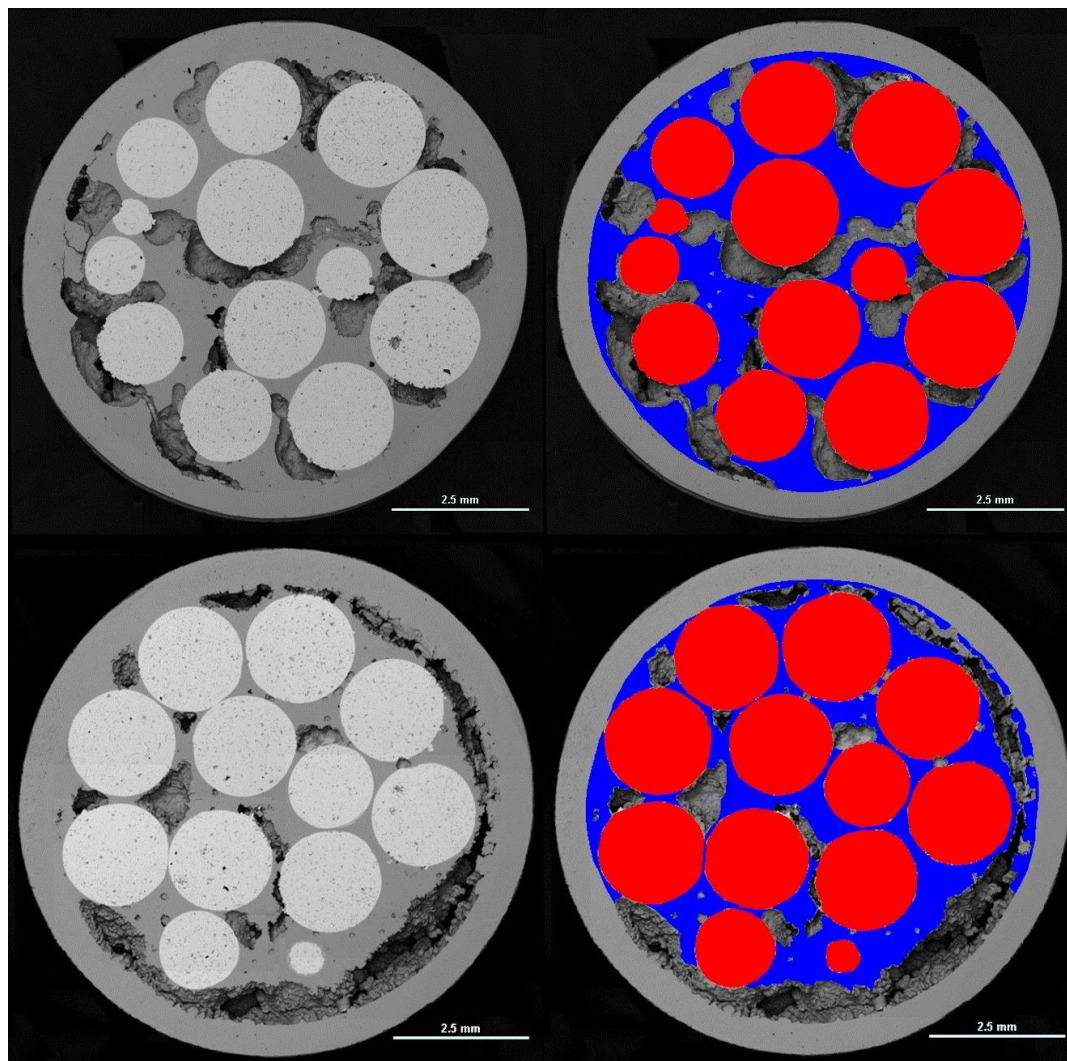
Vyleštěné vzorky byly podrobeny řádkovací elektronové mikroskopii v režimu detekce zpětně odražených elektronů (BSE). Snímky byly použity pro kvalitativní analýzu a stanovení plošného podílu jednotlivých složek.

Snímky dvou příčných řezů vzorku HDF-U-1 (kombinace uran-matrice) jsou v režimu BSE zachyceny na obr. 4. Vpravo jsou barevně vyznačeny jednotlivé strukturní složky (segmenty paliva červeně a matrice modře).



Obr. 4: Řez HDF-U-1A (nahore) a B (dole) v režimu BSE (vlevo) a s vyznačenými strukturními složkami (vpravo)

Podobně jsou v režimu BSE na obr. 5 zachyceny dva axiální řezy vzorku HDF-W-2 (kombinace wolfram-matrice).



Obr. 5: Řez HDF-W-2A (nahore) a B (dole) v režimu BSE (vlevo) a s vyznačenými strukturálními složkami (vpravo)

Výsledky obrazové analýzy v podobě plošných podílů jednotlivých složek obou vzorků jsou uvedeny v tab. 1. Vzorek HDF-W-2, jehož vstupní materiál měl podobu kuliček, dosahoval průměrně o necelých 11 % vyšší plošný podíl simulovaného paliva než vzorek s nepravidelnými uranovými částicemi. Pozorované rozložení matrice a pórů bylo na všech výbrusech rovnoměrné.

Tab. 1: Plošné podíly jednotlivých složek vzorků HDF-U-1 a HDF-W-2

	Podíl paliva [%]	Podíl matrice [%]	Podíl pórů [%]
HDF-U-1A	47,1	32,9	20
HDF-U-1B	45,5	29,6	24,9
HDF-W-2A	56,9	23,1	20
HDF-W-2B	57,6	22,1	20,25

Dle předpokladu vedlo užití sférického vstupního materiálu k dosažení vyššího podílu a rovnoměrnějšího rozložení štěpného materiálu v palivové tyči, což přispívá ke zvýšení homogenity palivového souboru, zlepšení neutronové bilance a vyšší predikovatelnosti objemových změn spojených s vyhořením. Za předpokladu užití paliva v podobě 2 mm kuliček na bázi U-Mo by uranová hustota vzorku HDF-W-2 odpovídala 9,1 až 9,7 g/cm³ [4].

Vyššího podílu paliva by mohlo být dosaženo užitím sofistikovanější metody plnění palivového pokrytí (např. vibrační plnění). Rovněž lze předpokládat, že při použití kuliček menších

rozměrů by bylo možné dosáhnout podílu paliva vyššího než 60 %. Výroba takových kuliček je však komplikována relativně vysokou tvrdostí, reaktivitou a toxicitou uranových slitin.

Závěr

V příspěvku byly připraveny a vyhodnoceny simulované vzorky paliva s vysokou hustotou na bázi kovových slitin uranu. Bylo ukázáno, že při užití vhodné geometrie paliva lze dosáhnout vyšší uranové hustoty, a tak tedy i lepších provozních vlastností, než dovolují dnes užívaná oxidická paliva. Při užití simulátorů sférických částic paliva byl dosažen podíl paliva 56,9 - 57,6 %, což by při užití slitiny na bázi U-Mo znamenalo uranovou hustotu 9,1 – 9,7 gU/cm³.

V návaznosti na získané výsledky bude dále v projektu probádána problematika:

- Výroby drobných kuliček uranových slitin umožňující dosažení vyšší homogenity a uranové hustoty palivového souboru.
- Charakterizace chování vysokohustotních paliv v havarijních podmínkách.

Poděkování

Prezentované výsledky byly realizovány s podporou Technologické agentury České republiky v rámci projektu „Národní centra kompetence“ pod číslem TN02000012 a navazující na výsledky již ukončeného projektu TAČR „THÉTA“ číslo TK03020034.

Literatura

- [1] PAPYNOV, E. K., SHICHALIN, O. O., MIRONENKO, A. Yu., TANANAEV, I. G., AVRAMENKO, V. A., SERGIENKO, V. I. UO 2 fuel pellets fabrication via Spark Plasma Sintering using non-standard molybdenum die [online]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018 [cit. 2024-09-09], vol. 307. ISSN 1757-8981. Available on: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/307/1/012029>
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Thermophysical Properties Database of Materials for Light Water Reactors and Heavy Water Reactors*. Vienna, IAEA, 2006, IAEA-TECDOC-1496.
- [3] SAVCHENKO, A. M. - KONOVALOV, Y. V. - LAUSHKIN, A. V. - KULAKOV, G. V. Zirconium Alloys with Low Melting Points [online]. *Inorganic Materials: Applied Research*. December 2019 [cit. 2024-09-10], vol. 10, no. 6, p. 1471-1476. ISSN 2075-1133. Available on: <https://doi.org/10.1134/S2075113319060212>
- [4] SAVCHENKO, Alexey. The issue of novel trends in fuel alloying to reduce interaction. In: *Proceedings of the RRFM-2018*. Munich, Germany: European Nuclear Society, 2018.

VÝPOČTOVÉ HODNOCENÍ RADIAČNÍHO BOBTNÁNÍ VE VNITŘNÍCH ČÁSTECH REAKTORU VVER-1000 V RÁMCI MEZINÁRODNÍHO BENCHMARKU DELISA-LTO

COMPUTATIONAL ASSESSMENT OF RADIATION SWELLING IN THE INTERNAL PARTS OF THE VVER-1000 REACTOR WITHIN THE DELISA-LTO INTERNATIONAL BENCHMARK

Vladislav Pištora a Matěj Listík

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Radiační bobtnání (swelling) je jedním z nejvýznamnějších degradačních mechanismů vnitřních částí reaktoru (VČR). Dochází k němu za teplot vyšších, než je provozní teplota reaktoru (až cca 400 °C), které jsou v tlustostěnných komponentách VČR dosahovány působením vnitřních zdrojů tepla vlivem gama záření. Současně je ke vzniku radiačního bobtnání nutná extrémně vysoká dávka ozáření (až 100 dpa). Výpočtové hodnocení radiačního bobtnání na modelové úloze pro plášť aktivní zóny VVER-1000 bylo provedeno v rámci evropského projektu DELISA-LTO. Benchmark se zúčastnili 4 partneři projektu a dosáhli dobré shody výsledků.

Abstract

Radiation swelling is one of the most significant degradation mechanisms of the internal parts of the reactor. It occurs at temperatures higher than the operating temperature of the reactor (up to approx. 400 °C), which are achieved in the thick-walled components of the internal parts of the reactor by the action of internal heat sources due to gamma radiation. At the same time, an extremely high dose of radiation (up to 100 dpa) is required to cause radiation swelling. Computational evaluation of radiation swelling on a model task for the VVER-1000 core envelope was carried out as part of the European DELISA-LTO project. Four project partners participated in the benchmark and achieved a good agreement of results.

LIMITY CHEMICKÝCH PARAMETRŮ V PRIMÁRNÍM OKRUHU JE – MOŽNOST JEJICH ÚPRAVY

CHEMICAL PARAMETERS OF THE PRIMARY WATER OF A NPP – THEIR LIMITS AND POSSIBLE ADJUSTMENT

Pavel Kůs ^{a)}, Monika Šípová ^{a)} a Michaela Joanidisová ^{b)}

^{a)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

^{b)} ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Příspěvek se zabývá limity chemických parametrů v primárním okruhu jaderných elektráren a jejich možnosti úpravy s ohledem na konstrukční materiály a vestavbu reaktorů. Cílem je ukázat, jak je možné s limity vybraných chemických sloučenin a prvků pracovat a na základě získaných poznatků ukázat či navrhnout možnosti jejich úpravy. Zvláštní pozornost bude věnována limitům rozpuštěného kyslíku (O_2) během najíždění jaderného reaktoru, organickému uhlíku (TOC) a křemíku (SiO_2) v průběhu nominálního výkonu bloku.

Abstract

The contribution discusses the water chemistry of the primary circuit in nuclear power plants. This chemistry is controlled by adding specific compounds and elements that affect the lifetime of structural materials. Therefore, their content is crucial not only for fuel campaigns but also for safety and reliability from a material perspective. The limits of selected parameters vary depending on the operational phase of the reactor. Consequently, the limits for reactor start-up differ from those for reactor shutdown. This contribution explains how to work with these limits and how they can potentially be adjusted. Special attention will be given to dissolving oxygen limits during nuclear reactor warm-up/start-up, organic carbon, and silicon during standard operation.

Chemické režimy v primárním okruhu

Hlavním cílem řízení a kontroly chemického režimu primárního okruhu (I.O.) tlakovodních reaktorů je:

- zajištění integrity potrubí a komponent primárního okruhu,
- zajištění integrity pokrytí palivových článků,
- snižování radiačních polí okolí primárního okruhu a minimalizace radioaktivního znečištění.

Pro kompenzaci reaktivity jaderného paliva se do chladiva I.O. tlakovodních reaktorů VVER i PWR dávkuje kyselina boritá (H_3BO_3). Acidita kyseliny borité je kompenzována přidavkem silné alkálie a radiolytická tvorba kyslíku je potlačena udržováním zvýšené koncentrace vodíku.

Poměrně značné koncentrace přídavných látek (H_3BO_3 , KOH, NH_3 , případně N_2H_4) s sebou nesou i možnost kontaminace chladiva nežádoucími nečistotami, které buď představují nebezpečí narušení integrity materiálů (Cl^- , F^-) anebo jsou aktivovány a zvyšují tak radiační zátěž (Ag-110m, Tritium). Další nečistoty (křemík, organické sloučeniny) mohou mít vliv na termohydraulické vlastnosti vodního systému.

Bohaté provozní zkušenosti jaderných elektráren (JE), VVER-440 a VVER-1000, dané narůstající dobou jejich provozu, podněcují ke možným změnám ve vedení chemického režimu chladiva I.O. Tyto změny je možné získanými poznatky a zkušenostmi postupně standardizovat.

Tento přístup k modifikaci chemického režimu I.O. je také podporován novými experimentálními výsledky z oblasti koroze konstrukčních materiálů a vlivu parametrů vodního prostředí

na korozní procesy. Řízení vodního režimu je tak ovlivněno zaváděním nejen nových poznatků, ale také nových technologií do praxe (např. režim s vyšším obsahem amoniaku, vodíkový režim, či využití technologie dávkování zinku do chladiva I.O.).

Tento příspěvek se zabývá limity pro parametry organického uhlíku, křemíku a rozpuštěného kyslíku v primárním okruhu JE.

Organické znečištění

Organické znečištění může mít za následek zanášení povrchu pokrytí palivových proutků či jiných vnitřních povrchů v technologii a zhoršovat tak přestup tepla (palivové proutky, parogenerátor). Další možnost rozkladu organických látek je oxidace na např. kyselinu mravenčí a tím může docházet k ovlivnění hodnoty pH.

V minulosti bylo organické znečištění hodnoceno přes parametr – nepolární extrahovatelné látky (NEL). Tento parametr již nevyhovuje současnému provozu, jelikož hodnotí jenom kvalitu vody v primárním okruhu přes obsah organických látek, např. olejů. Tento parametr ale v sobě „nenese“ informaci o organickém uhlíku, který je vázaný např. v kyselině mravenčí. Z tohoto důvodu byl zaveden parametr celkový organický uhlík (TOC), který v sobě nese informaci všech organických sloučenin a je v chladivu I.O. ve všech režimech bloku standardně sledován (diagnostický parametr) [1].

V rámci projektu na stanovení nového limitu pro organický uhlík v I.O. byly definovány hodnoty TOC v I.O. Na základě získaných informací byla vypracována doporučení a požadavky pro provoz primárního okruhu z hlediska obsahu celkového organického uhlíku [2].

Na začátku projektu byly definovány možné vstupy organických látek do I.O. a to: systémem doplňování vody do I.O., dávkováním korekčních chemikálií, rozkladem ionexů, zbytky olejů a vazelin, zbytky z dekontaminačních přípravků.

Jako nejvíce možný zdroj org. znečištění přichází v úvahu hydraulické oleje z HCČ a vazelína napadaná do bazénů z jeřábů. Ostatní zdroje je možné vyloučit důslednou kontrolou vstupních chemikálií dávkovaných do vod I.O.

Pro stanovení nového provozního limitu byla vzata konzervativní hodnota 0,5 mg/l TOC ve vodě vycházející ze stávajících limitů a byly provedeny výpočty. V těchto výpočtech byly brány dvě možné cesty rozkladu organických látek – redukce na anorganický „pevný“ uhlík a oxidace na kyselinu mravenčí. Tyto cesty byly zvoleny záměrně, jelikož v primárním okruhu, zejména v aktivní zóně reaktoru, je oxidační prostředí (radiolýza), ale samotná voda v primárním okruhu má redukční vlastnosti (obsah vodíku).

Při daném objemu reaktoru (brán VVER-1000) bylo spočítáno, že pokud se organický uhlík „rozpadne“ na anorganický uhlík, tak ho vznikne max. 170 gramů. Pokud by se toto množství anorganického uhlíku usadilo na palivových proutcích, tak dojde k tvorbě vrstvy o velikosti 14 μm . V opačném případě, pokud by veškerý organický uhlík oxidoval na kyselinu mravenčí, dojde k tvorbě 575 g kyseliny mravenčí. V případě, kdyby toto množství bylo v čisté demineralizované vodě, byla by hodnota pH okolo 4,1. Vzhledem k tomu, že v chladivu primárního okruhu je přítomna korekční chemikálie KOH, tak toto množství kyseliny mravenčí by bylo účinně neutralizováno.

Na základě výše napsaných poznatků bylo konstatováno, že limit $< 0,5 \text{ mg/l TOC}$ v chladivu I.O. je bezpečná hladina pro provozování.

Obsah křemíku v I.O.

V minulosti byl dalším hodnoceným parametrem v primárním okruhu obsah křemíku. Zvyšující se koncentrace křemíku v chladivu I.O. je pozorována u většiny jaderných elektráren [3]. Nejvyšší koncentrace křemíku jsou měřeny v bazénech s vyhořelým palivem a v bazénech, ze kterých se zaváží čerstvé palivo. Do nich se křemík dostává prostorem, kterým se přesouvá

čerstvé palivo do reaktoru (tj. z bazénu vyhořelého paliva – BSVP). U elektráren, které používají ke skladování paliva boraflexové mřížky (což není případ českých JE), jsou koncentrace křemíku ještě vyšší, a to kvůli rozkladu boraflexu v radiačním poli. Další příčinou vyšší koncentrace křemíku v I.O. je používání recyklované kyseliny borité, se kterou se zpět do okruhu vrací i křemík.

V přítomnosti dalších kationtů (zejména Al, Ca, Mg, Zn) tvoří křemík různé oxidy a silikáty. Tyto sloučeniny mají záporné teplotní koeficienty rozpustnosti, což znamená, že se přednostně usazují na nejteplejších místech systému, tj. na palivových proutcích. Vzniklé sraženiny se mohou zakonzentrovat v porézním jádře již vzniklých usazenin nebo ve vrstvě korozních produktů, a tím výrazně zvýšit riziko koroze např. Zircaloy-4.

V rámci projektu byly provedeny experimenty, které měly ověřit možnosti zvýšení limitu $< 1 \text{ mg/l}$ na $< 2 \text{ mg/l}$ Si v I.O.. Byly provedeny experimenty s různou koncentrací Si a různou koncentrací kationtů s vyšší afinitou ke tvorbě různých oxidů či silikátů (Al, Ca, Mg, Zn, Ni.) [4]. Tyto experimenty (které probíhaly i v autoklávu za simulovaných podmínek I.O. během nominálního provozu, pouze bez radiace) odhalily, že pro vznik aluminosilikátů je zásadní vyšší koncentrace Al iontů, které tvoří základní strukturu nečistot. Mezi pozitivní výsledky patří fakt, že ani vysoké koncentrace (cca $0,05 \text{ mg/l}$) těchto iontů (Al, Ca, Mg, Zn, Ni...) nepřispěly k navýšení tvorby nečistot.

Obsah kyslíku v I.O. během najíždění reaktoru na výkon

Posledním parametrem, který byl v rámci studie hodnocen, je koncentrace rozpuštěného kyslíku během najíždění reaktoru na minimální kritický výkon, před horkou tlakovou zkouškou bloku. V rámci projektu bylo diskutováno, jaký vliv má obsah kyslíku a teplota na průběh a formu koroze materiálů používaných v I.O. včetně pokrytí paliva (resp. palivových souborů).

Na základě poznatků byla diskutována možnost zvýšení limitu obsahu rozpuštěného kyslíku v chladivu při teplotě 120°C z $0,02 \text{ mg/l}$ na hodnotu $0,1 \text{ mg/l}$ ($100 \mu\text{g/l}$). Vyšší hodnota rozpuštěného kyslíku je běžnou praxí při najíždění západních lehkovodních reaktorů, které však používají odlišné konstrukční materiály v I.O. Zároveň byly uvažovány možné dopady na konstrukční materiály primárního okruhu a pokrytí paliva. V případě konstrukčních materiálů bylo hodnoceno především riziko poškození materiálů v důsledku iniciace a šíření trhliny, tedy riziko výskytu korozního praskání [5].

Literární rešerše a dostupné poznatky neodhalily žádná závažná rizika ve spojení se zvýšeným obsahem kyslíku na $100 \mu\text{g/l}$ roztoku kyseliny borité při teplotě 120°C z hlediska porušení integrity strukturních materiálů v I.O. [6]. Uvedené podmínky nemají známý reálný vliv na chování a tvorbu oxidické vrstvy na materiálech komponent palivových souborů používaných na českých jaderných elektrárnách.

Závěr

Předložený příspěvek ukazuje na možnosti práce s limity vybraných parametrů chladiva primárního okruhu jaderné elektrárny. Byla ukázána tvorba limitu pro celkový organický uhlík jako TOC. Bylo zjištěno, že hodnota $0,5 \text{ mg/l}$ TOC v primárním okruhu nemá negativní vliv na konstrukční materiály a vestavbu I.O.

Dále byla ukázána práce s hodnotou limitu pro křemík v I.O., kdy bylo provedeno několik typů experimentů s různými koncentracemi Si a nečistot (různé kationty) za podmínek chladiva primárního okruhu. Bylo zjištěno, že zvýšená koncentrace Si na 2 mg/l a vyšší koncentrace nečistot ve formě kationtů (zejména alkalických zemin) nepřispívají k navýšení tvorby nečistot typu nerozpustných silikátů.

Poslední část příspěvku se zabývala možnostmi navýšení hodnoty koncentrace rozpuštěného kyslíku z $0,02 \text{ mg/l}$ na hodnotu $0,1 \text{ mg/l}$ v průběhu najíždění reaktoru. Pro tuto změnu nebyla identifikována závažná rizika z pohledu koroze nebo poškození palivového pokrytí, a stejně tak

i v případě konstrukčních materiálů používaných v primárním okruhu, kdy byla uvažována především austenitická korozivzdorná ocel 08Ch18N10T.

Poděkování

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

Literatura

- [1] EPRI. *Review of VVER Primary Water Chemistry and the Potential for its Use in PWRs: Potassium Hydroxide and/or Ammonia Based Water Chemistries*. EPRI, 2002, Palo Alto, CA. 1003382.
- [2] EPRI. *Radiation Effects on Organic Materials in Nuclear Plants*. EPRI, Palo Alto, CA, NP-2129.
- [3] EPRI. *LWR Plant Water Silica Database, Revision 4*. EPRI, February 2000, Palo Alto, CA, TP-114974.
- [4] GASTEIGER, H. A. - FREDERICK, W. J. - STREISEL, R. C. Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1992, vol. 31, no. 4, p. 1183-1190-
- [5] FÉRUN, D. ed. *Nuclear Corrosion Science and Engineering* (Woodhead Publishing Series in Energy). 1st ed. Woodhead Publishing, 2013. ISBN 9781845697655.
- [6] GORDON, B.M. The Effect of Chloride and Oxygen on the Stress Corrosion Cracking of Stainless Steels: Review of Literature. *Material Performance*, 1980, vol. 19, no. 4, p. 29-38.

VÝSLEDEK NÁRODNÍHO PROJEKTU ZAMĚŘENÉHO NA TVORBU METODIKY HODNOCENÍ TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU PŘI TĚŽKÉ HAVÁRII

THE RESULT OF A NATIONAL PROJECT FOCUSED ON THE CREATION OF A METHODOLOGY FOR REACTOR PRESSURE VESSEL ASSESSMENT IN THE CASE OF A SEVERE ACCIDENT

Petr Gál

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Hodnocení tlakové nádoby reaktoru (TNR) v průběhu těžké havárie je stále celosvětově řešená problematika, která v dnešních dnech dostává základní obrysy. Protože se jedná o komplexní problematiku degradace TNR se zahrnutím tavení materiálu. Stále zůstávají otázky nad správností kritérií selhání TNR, ale také je vedena debata, jaký model tečení použít. V rámci národního projektu byly tyto a další otázky řešeny a výsledkem jsou veřejné metodiky pro hodnocení TNR s aplikací strategií udržení taveniny uvnitř i s uvažovaným protavením taveniny skrz stěnu TNR. Tyto metodiky určují základní postup pro hodnocení TNR, ale také na základě experimentální části projektu byla navržena kritéria selhání TNR. Příspěvek je zaměřen na jednotlivé části metodik a součástí je i názorná ukázka výpočtu napětově-deformačního a teplotního stavu TNR v průběhu těžké havárie.

Abstract

The evaluation of the reactor pressure vessel (TNR) during a severe accident is still a globally resolved issue, which is getting its basic outlines these days. Because it is a complex issue of TNR degradation with the inclusion of melting of the material. Questions still remain over the correctness of the TNR failure criteria, but there is also debate as to which creep model to use. Within the framework of the national project, these and other questions were solved and the result is a public methodology for the assessment of TNR with the application of strategies to keep the melt inside and with the considered melting of the melt through the wall of the TNR. These methodologies determine the basic procedure for TNR evaluation, but TNR failure criteria were also proposed based on the experimental part of the project. The contribution is focused on individual parts of the methodology and includes an illustrative example of the calculation of the stress-strain and temperature state of the TNR during a severe accident.

INTERAKCE MATERIÁLU VNĚJŠÍHO PLÁŠTĚ UKLÁDACÍHO OBALOVÉHO SOUBORU VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA S BENTONITOVOU BARIÉROU V PODMÍNKÁCH HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ-PROJEKT EURAD CONCORD

INTERACTION OF THE OUTER SHELL MATERIAL OF THE WASTE DISPOSAL PACKAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL WITH THE BENTONITE BARRIER UNDER THE CONDITIONS OF A DEEP GEOLOGICAL REPOSITORY – EURAD CONCORD PROJECT

Zbyněk Veselka ^{a)}, Šárka Šachlová ^{b)}, David Dobrev ^{b)}, Vlastislav Kašpar ^{b)}, Petr Večerník ^{b)},
Michaela Matulová ^{c)}, Zuzana Vávrovcová ^{a)}, Petr Brabec ^{a)}, Miroslav Krpec ^{a)}, Adam
Urbánek ^{a)} a Michaela Joanidisová ^{a)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s., Integrita a technický inženýring, Hlavní 130, 250 68 Husinec Řež

^{b)} ÚJV Řež, a. s., Radioaktivní odpady a vyřazování, Hlavní 130, 250 68 Husinec Řež

^{c)} Správa úložišť radioaktivních odpadů, Dlážděná 1004, 110 00 Praha 1

Abstrakt

V rámci projektu EURAD CONCORD (CONtainer CORrosion under Disposal conditions) byla sledována koroze vzorků uhlíkové oceli, odpovídající materiálu vnějšího pláště ukládacího obalového souboru, exponovaných v prostředí bentonitu za parametrů, simulujících podmínky uložení v hlubinném úložišti. Korozní rychlost oceli byla korelována s materiálovými analýzami exponovaných vzorků. Teplota, nasycení a složení bentonitu ovlivnily hloubku a charakter koroze uhlíkové oceli a parametry vrstev korozních a alteračních produktů vznikajících na kontaktu bentonitu s ocelí.

Abstract

A corrosion of carbon steel samples corresponding to the outer shell material of the waste disposal package exposed in a bentonite environment was monitored under conditions simulating the conditions of disposal in a deep geological repository as a part of the EURAD CONCORD (CONtainer CORrosion under Disposal conditions) project. The corrosion rate of the carbon steel was correlated with the material analyses. The temperature, saturation and composition of bentonite affected the depth and character of the attack on carbon steel and the parameters of the layers of corrosion and alteration products originating at the bentonite-steel boundary.

Úvod

Hlubinné úložiště (HÚ), s jehož zprovozněním se počítá v roce 2050 (Nařízení Komise EU 2022/1214 z 9. 3. 2022), musí zajistit dlouhodobou izolaci uložených radioaktivních odpadů. Do HÚ budou ukládány odpady, které nelze uložit do stávajících povrchových nebo přípovrchových úložišť. Jedná se o vyhořelé jaderné palivo (VJP), vysokoaktivní odpad (VAO) a středněaktivní odpad (SAO), který nesplňuje limity a podmínky pro uložení do přípovrchových úložišť. Hmotnost VJP je při uvážení 3 nových jaderných zdrojů odhadována na 9036 tun. Koncept izolace VJP v HÚ je založen na principu multibariérové ochrany, skládající se z bariér tvořených horninovým masivem HÚ, těsnicí (tzv. buffer) a zásypovou (tzv. backfill) bariérou, tvořenou bentonitem a úložným obalovým souborem (UOS) [1].

Konstrukční řešení UOS musí splňovat parametry vycházející z požadavků na strukturní integritu UOS (životnost a pevnost v tlaku a střihu), zamezení alterace bentonitu (teplota a stínění), limity záření pro manipulaci (stínění) a zamezení vzniku kritického stavu (podkritičnost). Životnost UOS se hodnotí zejména na základě požadavku, aby při očekávaném vývoji hlubinného úložiště (predikovaném čerpání životnosti) nedošlo k většímu ozáření reprezentativní

osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí $0,25 \text{ mSv.rok}^{-1}$. Pro palivo VVER-440 a VVER-1000 jsou uvažovány 2 varianty řešení UOS lišící se v konstrukčním řešení z důvodu různých rozměrů palivových souborů a jejich výkonu. Z hlediska dlouhodobé životnosti UOS je důležitá predikovatelnost koroze vnějšího obalu (VO) a vnitřního pouzdra (VP) UOS, proto byly vybrány materiály, které v daných podmínkách korodují ve stavu aktivity nebo jsou ve stavu stabilní pasivity. Jako materiál VO tak byla vybrána uhlíková ocel S355J2H+N a jako materiál VP korozivzdorná austenitická ocel EN 1.4404 [2].

Koroze uhlíkové oceli v prostředí HÚ závisí na teplotě, okolním prostředí (pH, oxidačně-redukční potenciál, přítomné anionty) a složení bentonitu. Experimenty prováděné v roztocích simulujících pórovou vodu bentonitu, vykazují řádově nižší korozní rychlosti v porovnání s experimenty provedenými přímo s pevnou bentonitovou fází [3]. Další proměnnou je vznik a transport korozních produktů. Ionty Fe^{2+} mohou vyvolat alteraci smektitu vedoucí ke snížené sorpční a bobtnací schopnosti bentonitu [4]. Ionty Fe^{2+} difundující bentonitem navíc mohou být oxidovány kyslíkem vázaným v bentonitu, což vede k precipitaci Fe^{3+} fází a narušování integrity bentonitu. Integritu může při vysokých korozních rychlostech narušit také plynný vodík, který vzniká, je-li rychlost difuze bentonitem nižší než rychlost jeho produkce. Integrita bentonitu je také narušena vysoušením rozhraní vlivem katodické reakce. V anaerobním prostředí je depolarizátorem voda a pokud se nedokáže doplňovat z hlubších vrstev bentonitu, dochází na rozhraní s ocelí k jeho vysoušení a praskání [5]. Agresivita prostředí závisí především na aniontovém složení pórové vody bentonitu. V českém návrhu HÚ se uvažuje s Ca-Mg-bentonitem tuzemské provenience, který na rozdíl od amerického bentonitu MX-80, s nímž pracuje většina výzkumných týmů ve světě, obsahuje nižší množství Cl^- a SO_4^{2-} . Obsah CO_3^{2-} je srovnatelný. Přitom se ukazuje, že změny v obsahu Cl^- a SO_4^{2-} ovlivňují fázové složení korozních vrstev a v konečném důsledku i korozní rychlost oceli. Zvýšený obsah SO_4^{2-} a nižší koncentrace CO_3^{2-} pak vede k tvorbě fázově odlišných korozních vrstev (chukanovit místo sideritu) [3].

Jedním z cílů projektu CONCORD řešeného v ÚJV Řež, a. s. ve spolupráci se SÚRAO bylo (1) simulovat korozi uhlíkové oceli v kompaktovaném bentonitu, (2) analyzovat hlavní korozní produkty a (3) identifikovat faktory mající vliv na jejich vznik [6].

Experiment

Interakce uhlíkové oceli s bentonitem byla hodnocena v závislosti na teplotě, nasycení a typu bentonitu. Exponované vzorky (plíšky oceli S355J2H+N o průměru 10 mm a tloušťce 1 mm) byly připraveny rozřezem modelového VO UOS a následným broušením o zrnitosti 46K. V experimentu byl použit Ca-Mg-bentonit (BCV) české provenience a referenční Na-bentonit (MX-80, Wyoming, USA) [6]. Syntetická granitická voda (SGW) využitá pro sycení bentonitu byla navržena ÚJV Řež, a. s. tak, aby odpovídala vodě z dolu Rožná odebrané 1000-1200 m pod zemským povrchem [7].

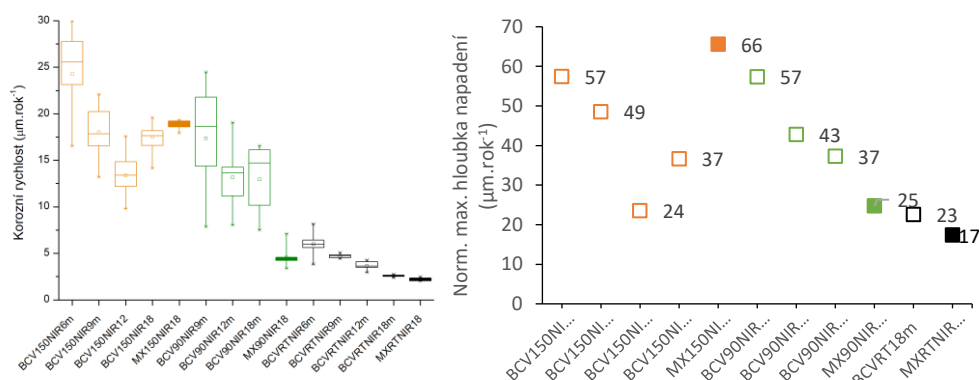
Vzorky uhlíkové oceli byly exponovány v korozních celách, v každé cele bylo umístěno 12 vzorků oceli fixovaných v kompaktovaném bentonitu ve třech vrstvách. Objemová hmotnost suchého bentonitu byla $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dle konceptu HÚ byla u vzorků exponovaných při 90, resp. 150 °C upravena vlhkost vstupního bentonitu na 20 %, resp. 15 %. Korozní cely byly propojeny kapilárami v ocelových pouzdrech vyplněných Ar a syceny odkysličenou SGW pod tlakem 5 MPa během celé expozice. Sytící tlak byl aplikován tlakovým výměníkem s pístem stlačovaným Ar. Po ukončení experimentu (6, 9, 12 nebo 18 měsíců) byly odebrány vzorky oceli a vzorky bentonitu pro geochemické a mineralogické analýzy. Vzorky oceli byly hodnoceny z hlediska korozního úbytku, morfologie povrchu a z hlediska prvkového a fázového složení korozních a alteračních produktů. Korozní úbytky byly stanoveny dle ČSN EN 10210-1 (odmoření korozních produktů v roztoku HCl inhibované urotropinem). Stav povrchu vyjmutých plíšků byl pozorován SEM TESCAN AMBER. Hloubka koroze byla v příčném řezu hodnocena pomocí metalografického mikroskopu Nikon Eclipse MA200. Prvková analýza povrchu

oceli v řezu byla provedena metodou SEM-EDS mikroanalýzy pomocí mikroskopu Tescan AMBER vybaveným EDS Oxford UltimMax 100. Pro pozorování v příčném řezu byly vzorky fixovány v epoxidové pryskyřici a pouhličeny. Fázová analýza korozních a alteračních produktů byla provedena pomocí XRD PANalytical XPertPRO MPD a Ramanova mikroskopu Nicolet DXR2. Vodné výluhy bentonitu byly analyzovány kapilární zónovou elektroforézou pomocí CE 7100 (Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , HCO_3^-) a atomovým absorpčním spektrometrem SavantAA (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{x+}). Obsah HCO_3^- byl určen alkalimetrickou titrací.

Výsledky a diskuse

Korozní rychlosti získané expozicí vzorků uhlíkové oceli v bentonitu se pohybují v řádu jednotek až prvních desítek $\mu\text{m}\cdot\text{y}^{-1}$, což odpovídá hodnotám získaným v modelových prostředích [8]. Korozní rychlost uhlíkové oceli klesá s délkou expozice. U oceli exponované v BCV při 150 °C klesá korozní rychlost z $24,29 \pm 3,19$ po 6 měsících na $17,51 \pm 1,12 \mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$ po 18ti měsících. Stejný trend poklesu korozní rychlosti v závislosti na délce experimentu je patrný u oceli exponované v BCV při 90 °C i u oceli uložené v BCV při laboratorní teplotě. S klesající teplotou je patrný pokles korozní rychlosti oceli exponované v BCV i v MX-80 (Obr. 1, vlevo).

Metodou LOM byla stanovena maximální hloubka koroze v dané rovině řezu. Díky plošnému charakteru koroze u všech analyzovaných plíšků [6] bylo možné maximální hloubku koroze vztáhnout na určitý časový úsek. Výsledky získané metodou hmotnostních úbytků jsou ve shodě s měřením maximální hloubky koroze, resp. tloušťky korozní vrstvy pomocí LOM při vztažení hodnot na stejný časový úsek (zde na rok). Na grafu normalizovaných hodnot (Obr. 1, vpravo) je patrná podobná maximální hloubka koroze v bentonitu BCV při 90 a 150 °C po stejné expoziční době, výrazně nižší korozní rychlost v MX-80 při 90 °C, snižování **normalizované** maximální hloubky koroze v čase i vymykání se vzorku exponovaného v nedostatečně syceném BCV při 150 °C po dobu 12 měsíců nízkou korozní rychlostí. Metody jsou v nesouladu pouze v případě vzorku MX-80 exponovaného při 150 °C, kde hmotnostní úbytky ukazují na srovnatelnou korozní rychlost s expozicí v BCV za stejných podmínek, zatímco normalizovaná maximální hloubka ukazuje na výraznější koroze vzorku exponovaného v MX-80. Vyšší míra koroze dle LOM však může souviset s roztržitostí korozní vrstvy v příčném řezu, která pak mohla být nadhodnocena.



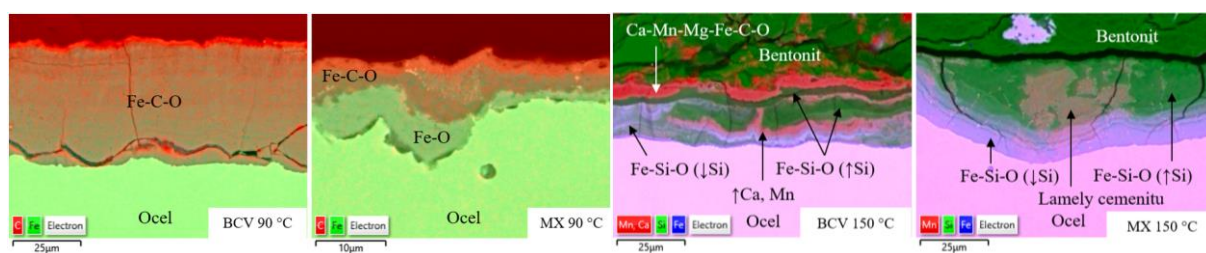
Obr. 1: Korozní rychlost (vlevo) a normalizovaná maximální hloubka koroze (vpravo) oceli zahříváné v nasyceném BCV a MX-80 (MX) při laboratorní teplotě (RT), 90 °C (90) a 150 °C (150)

Prvkové složení korozních vrstev analyzované pomocí SEM-EDS bylo různé v závislosti na teplotě expozice i použitém bentonitu (Obr. 2). Nejsložitější vrstvy z hlediska složení a distribuce prvků se tvořily v BCV při teplotě 150 °C. Dle složení a mikrostruktury vrstev lze předpokládat, že vrstva je výsledkem koroze oceli a alterace bentonitu. V korozní vrstvě na bázi Fe-Si-O se střídají vrstvy obsahující Si v minoritním množství (< 10 hm. %) a vyšším množství (15-20 hm. %), přičemž přechody mezi těmito oblastmi byly diskrétní i spojitě. Skladba vrstvy

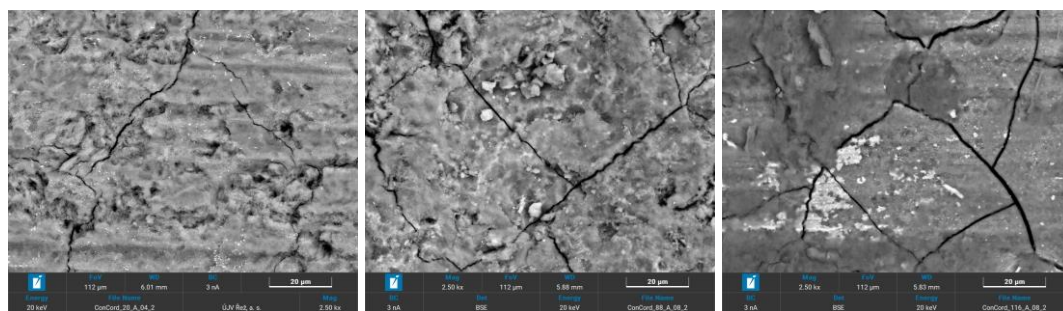
byla dále komplikována distribucí Ca a Mn, které se koncentrovaly v některých oblastech s minoritním obsahem Si. Mezi korozní vrstvou a bentonitovými úsadami se v některých oblastech vyskytovala diskrétně vymezená fáze na bázi Ca-Mn-Mg-Fe-C-O. Ve zjednodušeném popisu korozní vrstvy byla korozní vrstva směrem od bentonitu k oceli složena z Ca-Mn-Mg-Fe-C-O fáze, pod níž se často vyskytovaly Si bohaté (15-20 hm. %) oblasti a na rozhraní s ocelí se vyskytovaly oblasti Fe-Si-O s minoritním obsahem Si. U vzorků po expozici 6, 9 a 18 měsíců (Obr. 3, uprostřed) bylo patrné popraskání korozní vrstvy (v řezu i na povrchu), přičemž míra popraskání rostla s dobou expozice.

Korozní vrstva vzorků exponovaných při 90 °C v BCV byla z hlediska prvkového složení jednoduchá – v celém hloubkovém profilu byla tvořena fází na bázi Fe-C-O (obsah C byl nadhodnocen z důvodu pouhličení a C kontaminace, nicméně při porovnání s obsahem C na oceli byla patrná přítomnost C ve fázi korozní vrstvy), přičemž obsah C klesal směrem k oceli. Na rozhraní s bentonitem se vyskytovala fáze na bázi Ca-Mn-Mg-Fe-C-O. Korozní vrstva byla popraskaná po 12 a silněji po 18měsíční (Obr. 3, vlevo) expozici.

Korozní vrstva vzorku exponovaného při 90 °C v MX-80 byla rovněž primárně na bázi Fe-C-O, nicméně v některých oblastech se pod touto vrstvou vyskytovala fáze na bázi Fe-O. Popraskání korozní vrstvy nebylo pozorováno. Prvkové složení korozní vrstvy vzorku exponovaného v MX-80 při 150 °C bylo na bázi Fe-Si-O s obsahem Si v úrovni 20 hm. %, přičemž prvkové složení bylo v hloubkovém profilu konstantní až po oblast cca 10 μm od rozhraní s ocelí, kde obsah Si klesl na cca 5 hm. %. Při liniové analýze přes oblastí s různým obsahem Si byla na jejich rozhraní patrná zvýšená koncentrace S, a to v množství cca 2,5 hm. %. Korozní vrstva byla popraskaná (Obr. 3, vpravo), a to výrazněji v porovnání se vzorky BCV. V rámci korozní vrstvy, zvláště pak v její části s vyšší obsahem Si byly patrné lamely cementitu potvrzující přeměnu materiálu feriticko-perlitické mikrostruktury.



Obr. 2: Kombinované RTG mapy korozní vrstvy po 18měsíční expozici



Obr. 3: Popraskání korozní vrstvy po 18měsíční expozici – BCV 90 °C (vlevo), BCV 150 °C (uprostřed), MX-80 150 °C (vpravo)

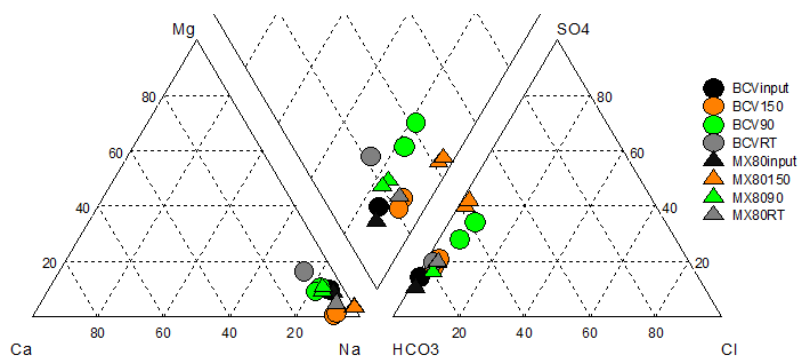
Při fázové analýze povrchu vzorků po expozici při 90 °C byly u obou bentonitů jako korozní produkty detekovány uhličitany – v případě BCV majoritně chukanovit ($\text{Fe}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) doprovázený sideritem (FeCO_3), v případě MX-80 byl detekován pouze siderit (Tab. 1). Při expozici 150 °C byl jako hlavní korozní produkt u obou bentonitů detekován magnetit (Fe_3O_4) doprovázený sideritem. Křemičitá fáze nebyla detekována na žádném ze vzorků. Na vzorcích

exponovaných v BCV byl při 90 i 150 °C detekován ankerit $(\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2)$. Uhlíčitanové složení korozních vrstev po 90 °C odpovídá SEM-EDS prvkové analýze, nicméně odlišná forma uhlíčitanů zjištěná XRD může být vysvětlením různé korozní rychlosti v bentonitech BCV a MX-80 v důsledku odlišných bariérových vlastností. Absence Si-bohatých fází v XRD analýzách pravděpodobně souvisí s jejich amorfním charakterem. Si akumulující se v korozních vrstvách na kontaktu bentonitu a oceli pochází z amorfních fází [6] a ze smektitu obsažených v bentonitu. Expozice při 150 °C zvyšuje podíl Si^{+4} uvolňujícího se do pórové vody a může způsobit nontronitizaci.

Tab. 1: Fázové složení korozních/alteračních produktů stanovené metodami XRD a Ramanovou spektroskopií (RS). Ank - ankerit, arg - aragonit, cal - kalcit, chuk - chukanovit, mag - magnetit, sd - siderit, nd - nedetekováno; difrakční linie velmi slabá (0+), slabá (+), střední (++), silná až velmi silná (+++).

Bentonit	T	Mag	Cal	Sd	Arg	Chuk	Ank	Bentonit	T	Mag	Cal	Sd	Arg	Chuk	Ank
BCV	RT	nd	0+	+	nd	0+	0+	MX-80	RT	nd	nd	nd	nd	nd	0+
	90	nd	+	+	RS	+++	+		90	nd	+	+++	nd	nd	nd
	150	+++	++	++	nd	nd	+		150	+++	+	+	nd	nd	nd

Výluhy vstupního i zahříváného bentonitu BCV a MX-80 byly typu Na-HCO_3 , resp. $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ (Obr. 4). Koncentrace kationtů ve vodných výluzích byla ovlivněna především zahříváním na 150 °C, po kterém poklesl podíl ve vodě vyluhovatelného Ca^{2+} a Mg^{2+} . Při expozici na 90 °C a při laboratorní teplotě je tento trend méně patrný. Koncentraci aniontů ovlivnila expozice na 90 i 150 °C u obou bentonitů. Zvýšená teplota vedla k nárustu podílu SO_4^{2-} na úkor HCO_3^- . Koncentrace SO_4^{2-} se významně zvýšila v BCV výluhu po expozici 90 °C. Zvýšená koncentrace SO_4^{2-} je spojována se vznikem chukanovitu namísto sideritu [3], což souhlasí s výsledky fázové analýzy korozních produktů. U MX-80 bylo patrné zvýšení koncentrace SO_4^{2-} po expozici 150 °C. Změny v koncentraci vodných výluhů souvisejí se složením sytící vody, která je $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ typu a s teplotním rozpouštěním karbonátů a síranů obsažených v bentonitech.



Obr. 4: Část Piperova diagramu vodných výluhů ze vstupních bentonitů (BCVinput, MX-80input) a z bentonitů obsahujících uhlíkovou ocel sycených při laboratorní teplotě (RT) nebo při 90 °C (90) a 150 °C (150)

Závěr

V rámci experimentu byl hodnocen vliv teploty na korozní chování oceli S355J2H+N při expozici v bentonitu. Teplota měla vliv na fázové složení korozních produktů při expozici v obou typech bentonitu (vznik magnetitu při 150 °C, uhlíčitanů při 90 °C) a v případě MX-80 též významný vliv na korozní rychlost. Nízká korozní rychlost vzorku po 90 °C v MX-80 v porovnání s BCV může být zapříčiněna odlišnými bariérovými vlastnostmi hlavních složek korozní

vrstvy. Vznik chukanovitu (BCV) místo sideritu (MX-80) je pravděpodobně důsledkem vyššího obsahu SO_4^{2-} . Korozní rychlost oceli je závislá na míře nasycení bentonitu, což dokazuje rozptýl hodnot nehomogenně sycených cel. Praskání korozní vrstvy pozorované na některých vzorcích může být problematické z důvodu pomalejšího snižování korozní rychlosti v čase. Při korozi oceli vzniká korozní vrstva, která tvoří bariéru mezi prostředím a ocelí vedoucí ke snižování korozní rychlosti. Dochází-li však k praskání korozní vrstvy, je bariéra narušována a povrch oceli odhalován a pokles korozní rychlosti v čase pak může být pomalejší. Teplota 150 °C je uvažována jako hlavní faktor ovlivňující rozpouštění amorfni Si^{4+} a její zabudování do korozních či alteračních produktů. Povahu a vliv křemičité fáze na korozní rychlost oceli by bylo vhodné objasnit dalšími experimenty především z důvodu jejího vlivu na integritu korozní vrstvy ovlivňující celkovou rychlost koroze. V současnosti probíhá dlouhodobý projekt simulující korozi materiálů předpokládaných pro český koncept UOS v in-situ podmínkách (SÚRAO Pilotní korozní experiment). Na základě výsledků in-situ a laboratorních měření se předpokládá aktualizace výpočtu životnosti UOS.

Poděkování

Tento výzkum byl financován z projektu EU Horizon 2020 na základě dohody N°847593 a ze zdrojů SÚRAO.

Literatura

- [1] HAUSMANNOVÁ, L. a kol. *Technické řešení hlubinného úložiště*, 2023. Praha, Správa úložišť radioaktivních odpadů, 2023, technická zpráva, SÚRAO TZ 711/2023.
- [2] MATULOVÁ, Michaela a kol. *Ukládací obalový soubor pro vyhořelé jaderné palivo v České republice*. Praha, Správa úložišť radioaktivních odpadů, 2023, technická zpráva, SÚRAO TZ 665/2023.
- [3] STOULIL, J. et al. Influence of temperature on corrosion rate and porosity of corrosion products of carbon steel in anoxic bentonite environment. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 443, p. 20-25, doi: 10.1016/j.jnucmat.2013.06.031
- [4] XIA, X. et al. Corrosion of carbon steel in compacted bentonite and its effect on neptunium diffusion under reducing condition. *Applied Clay Science*, 2005, vol. 28, p. 89-100, doi: 10.1016/j.clay.2004.01.002
- [5] LEUPIN, O. X. et al. Anaerobic corrosion of carbon steel in bentonite: An evolving interface. *Corrosion Science*, 2021, vol. 187, paper 109523, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109523
- [6] FERNÁNDEZ, A. M. et al. *Final version as of 29.04.2024 of deliverable D15.12 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593*. 2024, Report, Deliverable 15.12.
- [7] ČERVINKA, R. et al. *The geochemical evolution of DGR / preparation of geochemical model – Geochemical calculations and reactive transport modelling*. Prague, The Czech Radioactive Waste Repository Authority, 2018, technical report, SÚRAO TZ 271/2018/ENG.
- [8] NEFF, D. et al.: A review of the archaeological analogue approaches to predict the long-term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems. *Journal of Nuclear Materials*, 2010, vol. 402, p. 196-05, doi: 10.1016/j.jnucmat.2010.05.003

OZAŘOVACÍ EXPERIMENTY KONSTRUKČNÍCH OCELÍ NA LVR-15

IRRADIATION EXPERIMENTS OF STRUCTURAL STEELS IN LVR-15

Jitka Kahoun Hejhalová, Miloš Kytka, Milan Pěnkava a Witolda Soukupová

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Experimenty s ozařováním konstrukčních ocelí v reaktoru LVR-15 představují důležitou a nedílnou součást výzkumu vlivu neutronového záření na degradaci mechanických vlastností materiálů používaných v jaderné energetice.

Tyto experimenty umožňují simulovat podmínky, kterým jsou materiály vystaveny během provozu jaderných reaktorů, a tím poskytují cenné informace o jejich odolnosti a životnosti jednotlivých komponent. Výsledky těchto experimentů jsou experty aplikovány při hodnocení a predikci chování materiálů v reálných podmínkách, což přispívá k zajištění bezpečnosti a efektivitě provozu jaderných zařízení. Pro zajištění dosažení požadovaných parametrů (teplota, tok neutronů, fluence) jsou využívány různé typy ozařovacích sond a schránek.

Abstract

Experiments with the irradiation of structural steels in the LVR-15 reactor represent an important and integral part of research into the effects of neutron radiation on the degradation of the mechanical properties of materials used in nuclear energy.

These experiments allow for the simulation of conditions to which materials are exposed during the operation of nuclear reactors, thereby providing valuable information about their resistance and the lifespan of individual components. The results of these experiments are applied by experts in the evaluation and prediction of material behavior under real conditions, contributing to the safety and efficiency of nuclear facilities. Various types of irradiation probes and containers are used to ensure the achievement of the required parameters (temperature, neutron flux, fluence).

Úvod

Jaderná energetika je jedním z klíčových zdrojů energie v dnešním moderním světě. Bezpečnost a efektivita jaderných zařízení závisí na spolehlivosti jejích komponent, které jsou vystaveny mnoha nepříznivým podmínkám, včetně vysokých teplot a intenzivního neutronového záření. Konstrukční oceli, které jsou používány v jaderných zařízeních, musí být schopny odolat těmto podmínkám po dlouhou dobu, aniž by došlo k jejich kritické degradaci. Proto je nezbytné provádět experimenty, které simulují reálné provozní podmínky a poskytují informace o chování těchto materiálů, na základě mechanických zkoušek ozářených zkušebních těles.

Problematika ozařovacích experimentů

Ozařovací experimenty nám poskytují důležitá data k určení stupně degradace materiálů po vystavení ionizujícímu záření. Zejména se jedná o mechanické vlastnosti ozářeného materiálu, díky nimž můžeme predikovat životnost důležitých komponent jaderných elektráren (JE).

Poškození materiálu pozorujeme na následujících změnách mechanických vlastností ozářeného materiálu: zvýšení meze kluzu a pevnosti, snížení elasticity a kontrakce, snížení houževnatosti a zvýšení přechodové teploty.

Pro zajištění odpovídajícího návrhu ozařovacího experimentu jsou potřebné vstupní informace o požadovaných parametrech ozařování – teplota, tok neutronů a fluence. Na základě

těchto určujících parametrů je navržen typ schránky či sondy. Ozařovací experimenty pro účel doplnění svědečného programu probíhají ve výzkumném reaktoru LVR-15 v Řeži pomocí tří typů zařízení: sondy Chouca, plochých sond a schránek pro nízkoteplotní ozařování materiálů. Vzhledem k neopakovatelnosti například svědečných materiálů se často nejprve ozařují makety zařízení pro ověření správnosti ozařovacích parametrů.

Výzkumný reaktor LVR – 15 v Řeži

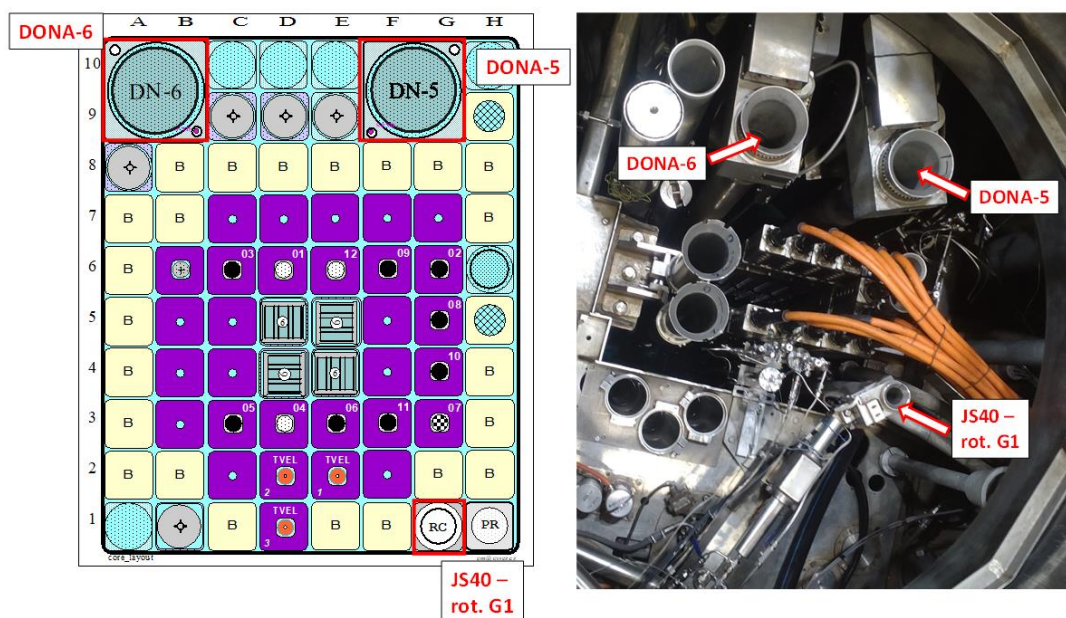
Historie výzkumného reaktoru v Řeži sahá až do roku 1957, kdy byl spuštěn reaktor VVR-S s tepelným výkonem 2 MW. Jednalo se o první výzkumný reaktor v ČSSR. Reaktor VVR-S fungoval až do roku 1987, kdy ho po rekonstrukci v letech 1988 až 1989 nahradil reaktor LVR-15. Rekonstrukce měla za cíl zvýšit výkon a bezpečnost reaktoru. Od roku 1989 až do roku 1995 běžel zkušební provoz, na který plynule navázal trvalý provoz. [1]

V současné době je výzkumný reaktor provozován společností Centrum výzkumu Řež s. r. o. a slouží nejen k ozařovacím experimentům v rámci svědečného programu životnosti JE, ale i k výrobě radioizotopů a vstupů pro výrobu radiofarmak. [1]

Reaktor LVR-15 – jedná se o lehkovodní beztlakový reaktor tankového typu s nuceným chlazením v nerezové nádobě. Provozní tepelný výkon je do 10 MW. Využíváno je palivo typu IRT-4M s obohacením 19,75 % ^{235}U . Moderátorem a chladivem je demineralizovaná voda s průměrnou teplotou 45°C. Pro funkci reflektoru je využívána buď také demineralizovaná voda, nebo bloky beryllia – toto je závislé na konkrétní konfiguraci aktivní zóny. [1]

Aktivní zóna je tvořena hliníkovou mříží (tzv. separátorem) ve tvaru obdélníku s buňkami v rastru 8 × 10, do kterého jsou zakládány palivové soubory nebo ozařovací kanály. Na obr. 1 je znázorněn příklad kartogramu aktivní zóny.

Reaktor je provozován po jednotlivých kampaních, které jsou dlouhé zhruba 21 dní. Z důvodu údržby, změny konfigurace aktivní zóny a případně výměny paliva je vždy mezi jednotlivými kampaněmi naplánována odstávka v délce trvání obvykle dvou týdnů. [1]



Obr. 1: Příklad kartogramu aktivní zóny a fotografie rozložení s vyznačenými vertikálními rotačními kanály ve výzkumném reaktoru LVR-15

Ozařovací sonda Chouca

Ozařovací sonda Chouca je jedno-buňkové ozařovací zařízení, do kterého je vkládán nosič zkušebních těles. Sonda je osazena šesti topnými sekcemi, které jsou zároveň vybaveny dvojicí termočlánků pro indikaci teploty v dané sekci.

Teplotní rozsah pro ozařování je od 200 do 350 °C, a to v prostředí inertního plynu – hélia, nebo směsi hélia a argonu. Množství inertního plynu, případně i poměr plynů ve směsi, je během ozařování kontrolováno a může být i upravováno.

Nosič zkušebních těles tvoří nosná trubka, která je osazena termočlánky pro aktivní sledování teploty u zkušebních těles v reálném čase, na které jsou nasunuty bloky se zabudovanými zkušebními tělesy.

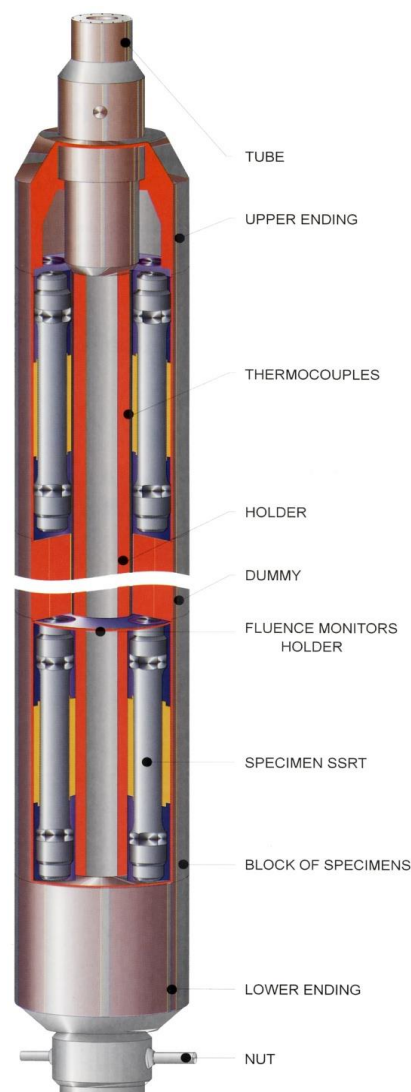
Nosný element zkušebních těles je sestaven na nosné trubce, na okrajích vymezen horní a dolní koncovkou, a mezi ně jsou vloženy bloky se zkušebními tělesy a ploché držáky monitorů fluencí (dozimetrické vložky) ve formě kovových fólií, případně drátů. Od konce nosné trubky je stažen maticí.

Pro lepší představu je přiložen 3D model a fotografie spodní části nosiče pro ozařovací sondu Chouca, kde jsou zobrazeny všechny zmíněné komponenty.

Typy zkušebních těles pro mechanické zkoušky, které lze ozářit v ozařovací sondě Chouca, jsou například vzorky pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy, tělesa 0,5T CT pro zkoušku lomové houževnatosti, nebo tahové vzorky různých typů až do průměru 12 mm.

Ozařování musí probíhat minimálně dvě kampaně (vždy sudý počet kampaní), protože nosič musí být mezi kampaněmi otočen, aby zkušební tělesa obdržela obdobnou fluenci z obou stran. Otočení nosiče je proveditelné pouze při odstávce reaktoru.

Tento typ ozařování je nejčastěji využíván pro materiály tlakové nádoby reaktoru (TNR), případně pro materiály vnitřních částí reaktoru (VČR).



Obr. 2: 3D model a komponenty nosiče pro ozařovací sondu Chouca před a po kompletaci

Plochá sonda

Plochá sonda pro ozařování je vyrobena velikostně buď čtyř-buňková, nebo šesti-buňková (buňky separátoru aktivní zóny reaktoru).

Teplotní rozsah pro ozařování v ploché sondě je od 200 do 300 °C. Teplotní rozsah umožňuje ozařovat materiály TNR a VČR.

Ozařovací plochá sonda je složena z nosiče zkušebních těles zasunutého do hermetického nerezového pouzdra sondy a dvou desek, které pouzdro i s nosičem zkušebních těles svírají a zároveň jsou sondě vytěsnitelem. Do sondy je při ozařování přiváděn inertní plyn – hélium, nebo směs hélia a argonu.

Nosič zkušebních těles je tvořen dvěma topnými deskami, sešroubovanými příčkami. Z vnější strany topných desek je vrstva $ZrSiO_4$ s proměnnou tloušťkou, která pomáhá vyrovnávat rozdíly v množství generovaného tepla podél výšky sondy. V každé topné desce jsou vyhřívače, regulační termočlánky a termočlánky měřících teplotu podél výšky sondy. Celkový počet termočlánků je až 30 kusů v ozařovací sondě. Teplota je monitorována v reálném čase.

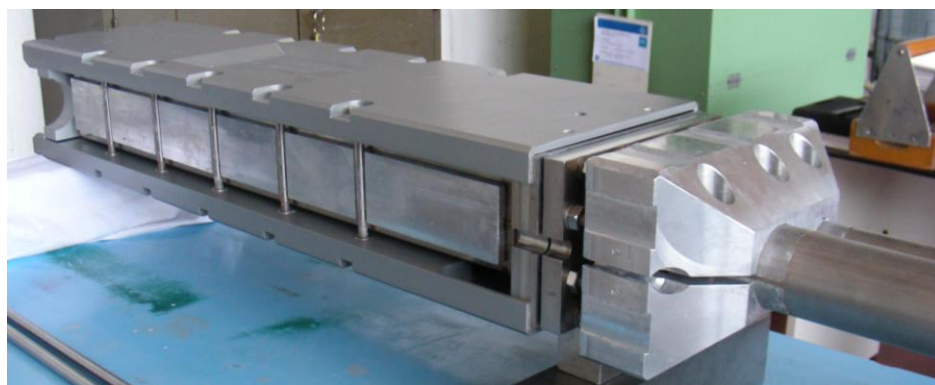
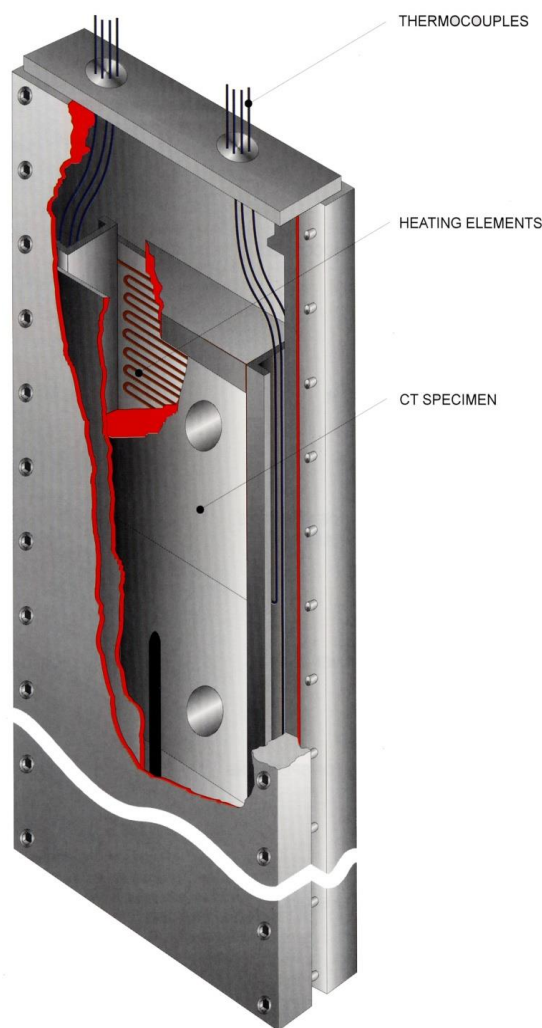
Počet topných sekcí se liší dle provedení sondy – u čtyř-buňkové je celkem šest, nebo osm topných sekcí, u šesti-buňkové je celkem osm topných sekcí.

Fluence neutronů je monitorována kovovými fóliemi, nebo dráty.

Pro lepší představu je přiložen zjednodušený 3D model a fotografie sestavené šesti-buňkové sondy.

Sonda pojme až 6 vzorků typu 1T CT (4-buňková), nebo 4 vzorky typu 2T CT (6-buňková), respektive různé typy zkušebních těles až do objemu zmíněných vzorků. Je to také vhodná metoda pro ozáření uceleného bloku materiálu, který bude využit pro další zpracování a následně výrobu zkušebních těles až po ozáření.

Doba ozařování musí probíhat minimálně dvě kampaně (vždy sudý počet kampaní) jako v případě ozařování v sondě Chouca, protože sonda musí být otočena, aby zkušební tělesa obdržela obdobnou fluenci z obou stran. Otočení sondy je proveditelné pouze při odstávce reaktoru.



Obr. 3: 3D model a sestavená šesti-buňková plochá sonda

Schránky pro nízkoteplotní ozařování

S prodlužováním životnosti reaktorů je potřeba se zaměřit na další důležité komponenty v blízkosti TNR. Při delším provozu jsou tyto komponenty vystaveny nezanedbatelnému neutronovému záření. Tento fakt sebou přináší odlišné požadavky na ozařovací parametry oproti ozařování materiálů TNR a VČR – a to nižší teplotu ozařování a nižší fluence.

V reaktoru LVR-15 lze takovéto ozařování uskutečnit pouze v rotačních vertikálních kanálech, do kterých je možné zakládat a vyjímat schránky se zkušebními tělesy během probíhající kampaně, bez nutnosti odstavení reaktoru, a to z důvodu, že požadované fluence je dosaženo pro některé ozařovací podmínky už v řádu jednotek hodin po vložení do kanálu.

Z důvodu zajištění homogenního přenosu tepla uvnitř schránky tvoří vestavbu kompaktní ocelový válec, který se skládá z nosiče zkušebních těles (ocelová trubka s víčky), ve kterém jsou umístěny jednotlivé ocelové bloky s otvory na zkušební tělesa, držáky s kovovými fóliemi (slouží jako monitory fluencí), a dalšími díly k úplnému vyplnění objemu nosiče. Na obr. 4 jsou všechny tyto komponenty. Dále na obr. 5 je schéma schránky v řezu.

Rotace schránky je výhodná pro rovnoměrnou distribuci fluencí pro jednotlivá zkušební tělesa. Zároveň je ale i nevýhodou – do schránky nemohou být zavedeny termočlánky, které by během ozařování měřily aktuální teplotu, a nemůže být zaveden ani přívod inertního plynu.

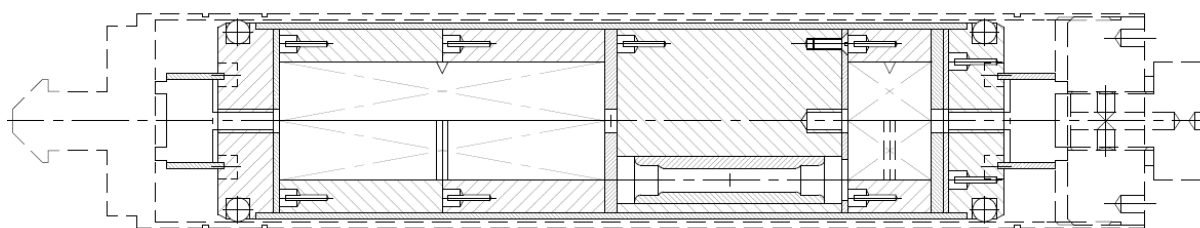
K ověření nejvyšší dosažené teploty při ozařování je využita pasivní metoda monitorování – tavné indikátory teplot (TIT), které se běžně využívají i při ozařování v rámci svědečného programu na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Vyhodnocování stejně tak jako další kroky ohledně TIT jsou prováděny v souladu s normou ASTM. [2]

Teplota ozařování se pohybuje od 60 do 220°C. Teplo je generováno zejména gama ohřevem při ozařování. Množství tepla ve schránce upravujeme pomocí velikosti vrstvy inertního plynu – hélia, které slouží jako izolační a teplosměnné medium, mezi schránkou a nosičem zkušebních těles. Schránku je nutné héliem naplnit a zatěsnit před samotným ozařováním.

Typ a počet ozařovaných zkušebních těles v jedné schránce závisí na typu konfigurace schránky.



Obr. 4: Komponenty schránky pro nízkoteplotní ozařování před kompletací



Obr. 5: Schématický řez sestavené schránky se zkušebními tělesy pro nízkoteplotní ozařování

Závěr

Výzkumný reaktor LVR-15 v Řeži hraje klíčovou roli v provádění ozařovacích experimentů a poskytuje nezbytné zázemí pro výzkum a vývoj v oblasti jaderné energetiky. Výzkumný reaktor je provozován společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. a slouží nejen k ozařovacím experimentům, ale i k výrobě radioizotopů a radiofarmak.

Pro ozařovací experimenty ve výzkumném reaktoru LVR-15 v Řeži jsou využívány různé typy sond a schránek, které umožňují dosažení požadovaných parametrů ozařování, jako je teplota, tok neutronů a fluence. Mezi používané metody ozařování se řadí ozařovací sonda Chouca, ploché sondy (čtyř-buňkové, nebo šesti-buňkové) a schránky pro nízkoteplotní ozařování. Každé z těchto zařízení má specifické vlastnosti a je určeno pro různé druhy ozařovaných materiálů a požadované druhy experimentů.

Celkově lze konstatovat, že provedené experimenty s ozařováním konstrukčních ocelí v reaktoru LVR-15 přinášejí důležité poznatky pro zajištění bezpečnosti a efektivity provozu jaderných zařízení. Tyto poznatky jsou aplikovány při hodnocení a predikci chování materiálů v reálných podmínkách, což přispívá k dlouhodobé spolehlivosti a prodlužování životnosti jaderných elektráren.

Literatura

- [1] CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ. *Výzkumný reaktor LVR-15* [online]. Centrum výzkumu Řež s.r.o. [cit. 2024-09-01]. Dostupné z: <https://www.cvrez.cz/cs/vyzkum-a-sluzby/provoz-reaktoru/vyzkumny-reaktor-lvr-15-12065>
- [2] ASTM E1214-11 (Reapproved 2023) – *Standard Guide for Use of Melt Wire Temperature Monitors for Reactor Vessel Surveillance* [online]. ASTM International [cit. 2024-09-15]. Available on: <https://www.astm.org/e1214-11.html>

HODNOCENÍ VLIVU TEPELNÉHO STÁRNUTÍ NA MATERIÁLECH PRIMÁRNÍHO OKRUHU EBO-V1 V RÁMCI PROJEKTU DELISA-LTO

EVALUATION OF THE EFFECT OF THERMAL AGEING ON EBO-V1 PRIMARY CIRCUIT MATERIALS IN THE DELISA-LTO PROJECT

Petra Klatovská ^{a)}, Ivana Schnablová ^{a)}, Radim Kopřiva ^{a)}, Veronika Kozáková ^{a)}, Zdeněk Fencel ^{b)} a Petra Gávelová ^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Cílem projektu DELISA-LTO je důkladné porozumění degradačním jevům materiálů, jako je tepelné stárnutí a bobtnání (swelling), které patří mezi významné procesy degradace konstrukčních materiálů jaderných elektráren (JE). Výzkum v rámci projektu DELISA-LTO (DEscription of the extended LIifetime and its influence on the SAFety operation and construction material performance – Long Term Operation with no compromises in the safety) je zaměřen na materiály primárního okruhu vyřazené jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích V1. Tyto materiály byly vystaveny skutečným provozním podmínkám po dobu 28 let, což umožňuje využít výsledky výzkumu k podpoře dlouhodobého provozu současných JE. Materiály jsou hodnoceny jak v referenčním (výchozím) stavu, tak po dlouhodobém provozu a následně po tepelném stárnutí simulujícím provoz JE po dobu minimálně 60 let. Výsledky jsou získávány kombinací různých experimentálních technik – např. mechanickým testováním, mikrostrukturním hodnocením a nedestruktivními kontrolami, pro zvýšení přesnosti výsledků se projekt navíc zaměřuje na mezilaboratorní srovnávání.

Abstract

The main object of DELISA-LTO ((DEscription of the extended LIifetime and its influence on the SAFety operation and construction material performance – Long Term Operation with no compromises in the safety) project is detailed understanding of material degradation phenomena like thermal ageing and swelling, which are significant degradation processes in structural materials of nuclear power plants. The research focuses on materials from the primary circuit of the decommissioned Jaslovské Bohunice V1 nuclear power plant (NPP). These materials have been exposed to real operating conditions for 28 years, enabling the research results to support long-term operation and lifetime extension of current NPPs. The materials are evaluated both in their initial state and after long-term operation and will also be subjected to thermal ageing simulating NPP operation for a minimum of 60 years. The results are obtained by a combination of different experimental techniques - e.g., mechanical testing, microstructural analyses, and non-destructive testing. Moreover, to obtain the accurate results, the project focuses on round-robin analyses.

Úvod

Degradace materiálů, zejména degradace způsobená vlivem rychlých neutronů, představuje hlavní předmět výzkumu ve vztahu k prodloužení životnosti komponent jaderných elektráren. Historicky se výzkum zaměřoval zejména na hodnocení křehkosti komponent JE (zejména tlakové nádoby reaktorů) vyvolanou ozářením. Potřeba prodloužení životnosti komponent JE však vyžaduje komplexnější hodnocení zaměřené na různé degradační mechanismy, které vznikají vlivem dlouhodobého provozu, včetně swellingu (radiační bobtnání), únavy, tepelného stárnutí a také korozního poškození. Cílem článku je vysvětlit klíčové výzkumné cíle projektu DELISA-LTO se zdůrazněním na změnu přístupu v hodnocení jevů tepelného stárnutí a swellingu.

Hlavní pozornost je věnována zejména hodnocení tepelného stárnutí a analýze experimentálních dat, která je řešena ve work package 4 (WP4) – Experimental validation and test. Experimentální data poslouží jako základ pro vytvoření predikčních modelů tepelného stárnutí. Dále bude hodnoceno křehnutí materiálů vlivem dlouhodobého provozu, korozní odolnost apod.

Projekt DELISA-LTO začal v polovině roku 2022 a konec projektu je naplánován na polovinu roku 2026.

Experimentální materiál

Pro potřeby řešení projektu byly vybrány materiály z primárního okruhu vyřazené jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice V1 (EBO V1) (Tab. 1, Obr. 1), konkrétně z 1. a 2. bloku, které byly 28 let v provozu (Tab. 1). Při výběru komponent byl hodnocen jak stav strukturního materiálu (výchozí stav, počet provozovaných let), tak typ materiálu – rozlišení základního materiálu, svarového kovu a tepelně ovlivněné zóny.

Tab. 1: Vybrané komponenty pro testování v rámci projektu DELISA-LTO

Component	Material and state
Main circulation piping	08Ch18N12T - NPP EBO V1 – initial state; BM
Main circulation piping	08Ch18N12T+WM - NPP EBO V1 – after 28 years in operation; BM, WM, HAZ
Main circulation piping – triple T-junction	08Ch18N12T+WM – NPP EBO V1 – after 28 years in operation; BM, WM, HAZ
Pressurizer surge line	08Ch18N10T - NPP EBO V1 – after 28 years in operation; BM
Pressurizer surge line	08Ch18N10T - NPP EBO3 – initial state; BM



Obr. 1: Komponenty primárního okruhu JE Jaslovské Bohunice V1

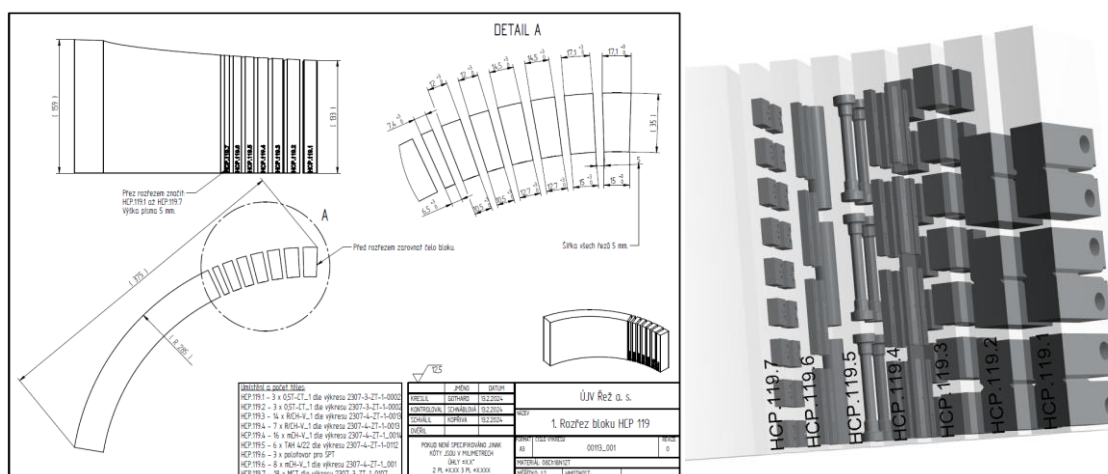
Experimentální matice

Experimentální matice byla vytvořena v rámci WP4 – Experimental validation and test (část matice je zobrazená na Obr. 2). Matice slouží jako komplexní tabulka zahrnující všechny zapojené laboratoře, materiály a jejich stav, příslušné metody testování, typy zkušebních těles a jejich geometrii (Obr. 3). Tato rozsáhlá experimentální matice tvoří základ pro mezilaboratorní porovnání mezi jednotlivými partnery projektu. Zkušební tělesa jsou rozdělena na standardní a miniaturizovaná, což umožní srovnání konvenčních zkušebních metod s inovativními přístupy za použití zkušebních těles miniaturizovaných rozměrů. Zahrnuty jsou následující zkušební metody: zkouška vrubové houževnatosti, zkouška tahem, zkouška statické lomové houževnatosti, měření tvrdosti, Small punch testy (SPT), skenovací elektronová mikroskopie (SEM), světelná mikroskopie a transmisní elektronová mikroskopie (TEM). Dále

nedestruktivní metody testování (NDT) a další metody jako např. pozitronová anihilační spektroskopie.

DELISA-LTO – WP2/WP4 Experimental matrix			Experimental Technique		A1 - Impact testing					
			Available / Participating Laboratory		CVR	IPP		EK-CER		UUV
Material No.	Material (description, provider, operational temperature)	Material Type	Material state / Specimen geometry	M	ST	M	ST	ST	M	M
1	Main circulation piping - 08Ch18N12T - NPP V1 – initial state (VUJE) - Top = 294 °C	BM	As received	■	■	-	-	■	■	■
			Thermal Aged (450 °C / 2165 hours)	■	-	-	-	-	■	-
				mini-Charpy (4x3x27,5 mm) Charpy-V (10x10x55 mm) mini-Charpy (4x3x27,5 mm) Charpy-V (10x10x55 mm) Charpy-V (10x10x55 mm, EBW reconstitution) mini-Charpy (4x3x27,5 mm) mini-Charpy (4x3x27,5 mm)						
Specimen type / method										

Obr. 2: Příklad části experimentální matice projektu DELISA-LTO



Obr. 3: Příklad rozřezové dokumentace k výrobě zkušebních těles, ÚJV Řež, a. s.

Hodnocení tepelného stárnutí

Materiály obecně podléhají procesu tepelného stárnutí. V projektu budou nejprve analyzovány materiály v původním stavu, následně budou zkoumány vzorky, které byly vystaveny reálným provozním podmínkám po dobu 28 let. Následně budou oba typy vzorků podrobeny urychlenému tepelnému stárnutí v laboratorních podmínkách, které simuluje degrační mechanismy očekávané během 60leté provozu.

Doba zrychleného stárnutí v laboratorních podmínkách byla stanovena pro všechny materiály pomocí Arrheniovy rovnice a žíhací teplota byla zvolena na 450 °C tak, aby se se zamezilo změně mikrostruktury během tepelného stárnutí a nedošlo ke zkreslení výsledků. S přihlédnutím k těmto parametrům byly vypočteny doby umělého stárnutí tak, aby odpovídaly přibližně 15, 30 a 60 letům provozu.

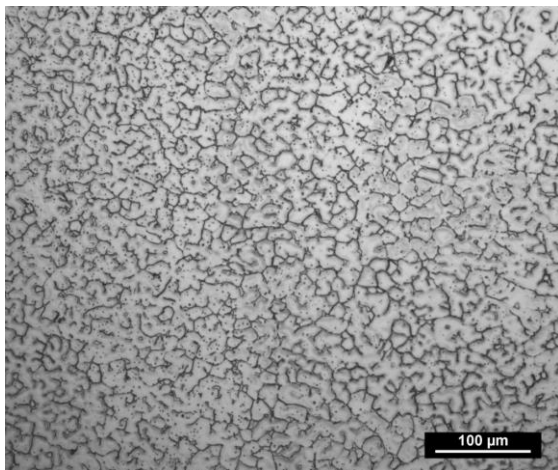
První výsledky na experimentálních materiálech EBO-V1 – hlavní cirkulační potrubí, tlakové přírodní potrubí

Mikrostrukturní analýza svarového spoje

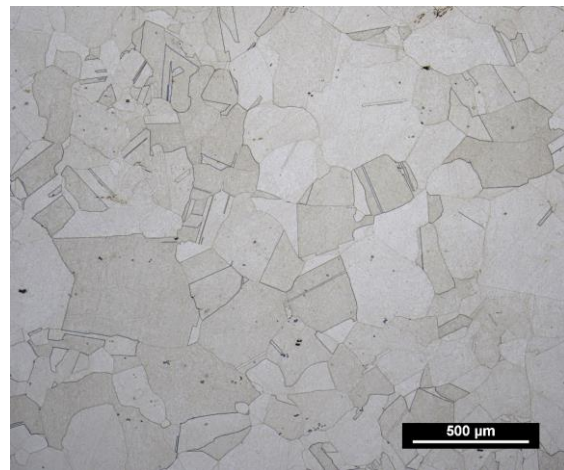
V rámci WP4 byla hodnocena mikrostruktura vzorku základního materiálu (ZM) 08Ch18N12T a svarového kovu (SK) hlavního cirkulačního potrubí. Vzorky byly vystaveny 28leté expozici (až 294 °C) v jaderné elektrárně Bohunice V1, 2. blok.

Mikrostruktura svarového kovu je tvořena austenitickou dendritickou strukturou typickou pro solidifikaci typu FA s obsahem feritické fáze 6 až 7 % (Obr. 4).

Základní materiál je tvořen austenitickým zrnem s viditelným dvojčatením (Obr. 5) a delta feritem, jehož průměrný objemový podíl byl 0,2 %. Delta ferit byl v ZM vyloučen v podobě pásů, které jsou rovnoběžné se směrem tváření. Struktura základního materiálu je tvořena jak jemnějšími zrny (do 100 µm), tak i zrny nadměrné velikosti (400-500 µm). Průměrná velikost zrna se u jednotlivých vzorků pohybovala v rozmezí 120 až 140 µm. Ve svislém směru, který je rovnoběžný se směrem tváření, jsou zrna mírně protaženější. Ve struktuře základního materiálu byly pozorovány tři typy vměstků. Oranžovo-šedé ostrohranné vměstky pravděpodobně Ti (C, N) byly pravidelného i nepravidelného tvaru. Tento typ vměstku se sestává z oranžového jádra (nitrid titanu), které je obklopené šedým okrajem (karbid titanu), viz Obr. 6. Hnědošedé vměstky pravděpodobně odpovídají TiC, případně Ti (C, S). V případě jemné disperze částic se s největší pravděpodobností jedná o karbidy TiC.

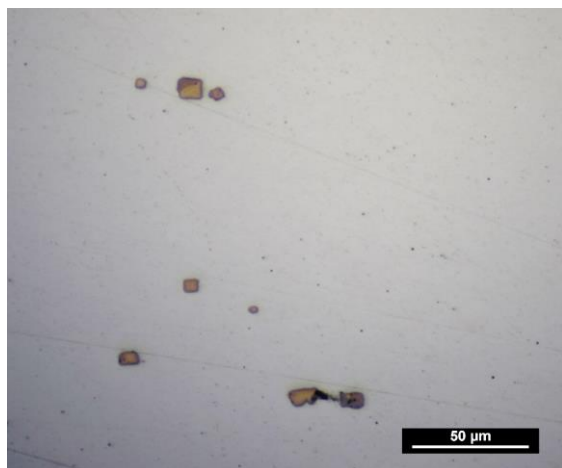


Obr. 4: Mikrostruktura svarového kovu, leptáno roztokem Adler, zvětšení 200x. Hlavní cirkulační potrubí EBO-V1, 08Ch18N12T.

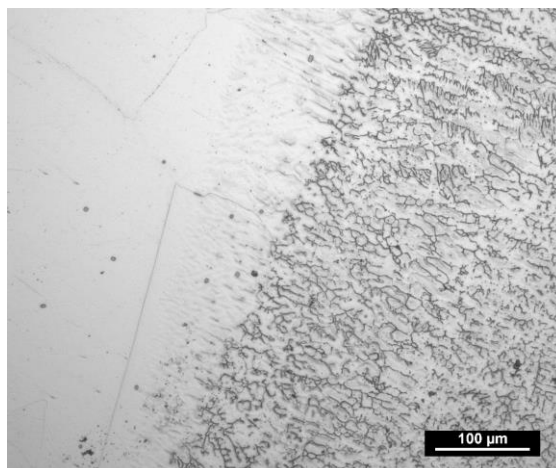


Obr. 5: Mikrostruktura základního materiálu, leptáno roztokem Vogel, zvětšení 50x. Hlavní cirkulační potrubí EBO-V1, 08Ch18N12T.

Oblast tepelně ovlivněné zóny (TOZ) nebyla z mikrostruktury jasně patrná. Tepelné ovlivnění základního materiálu bylo možné posuzovat pouze podle změny morfologie delta feritu. Na rozhraní SK/ZM dochází k transformaci delta feritu, kterou lze pozorovat do vzdálenosti 100 až 130 µm od rozhraní SK/ZM (Obr. 7).



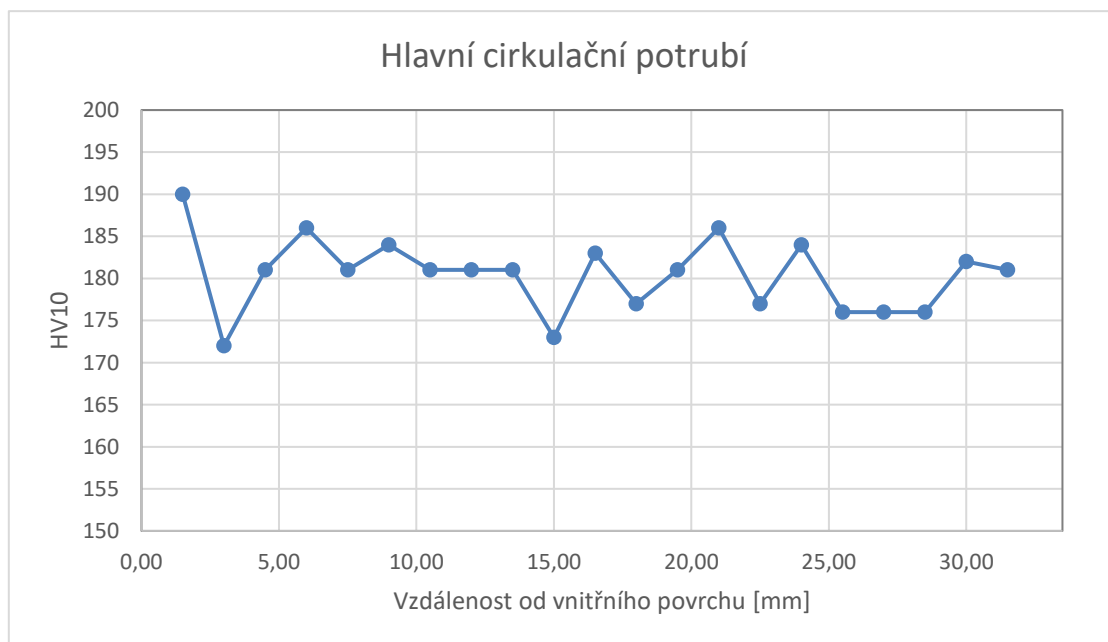
Obr. 6: Ostrohranné vměstky Ti (C, N) v ZM, neleptáno, zvětšení 500x. Hlavní cirkulační potrubí EBO-V1, 08Ch18N12T.



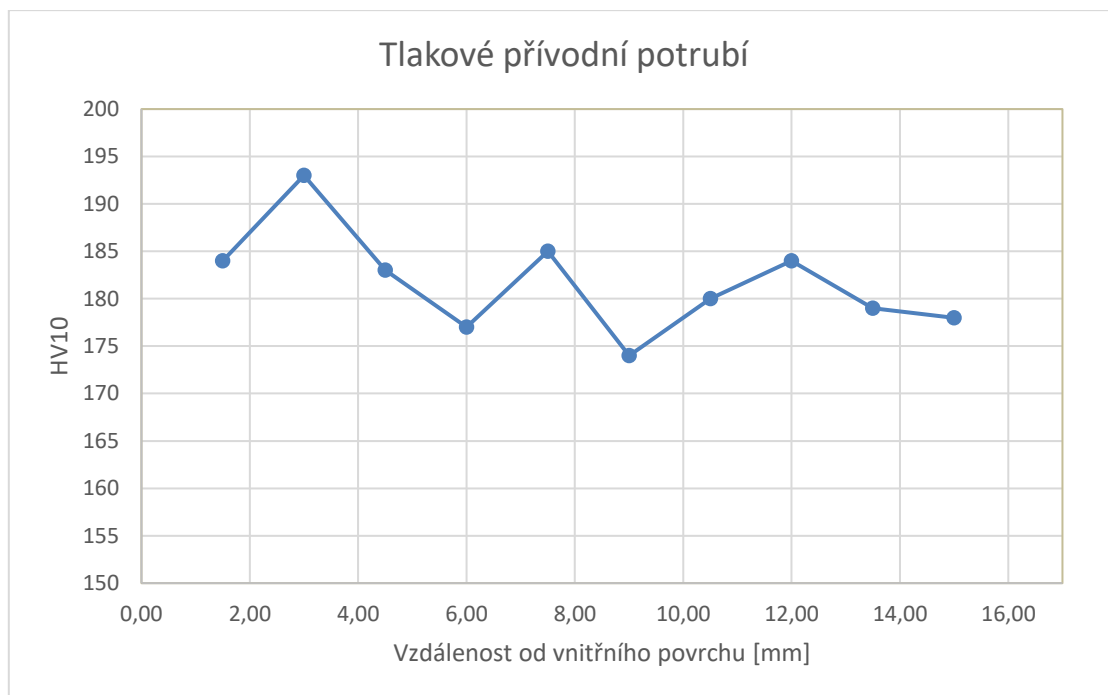
Obr. 7: Mikrostruktura TOZ na rozhraní ZM/SK, leptáno roztokem Adler, zvětšení 200x. Hlavní cirkulační potrubí EBO-V1, 08Ch18N12T.

Měření tvrdosti

V současné době provedeno měření tvrdosti HV10 na dvou materiálech ve výchozím stavu – jednalo se o vzorky z hlavního cirkulačního potrubí a tlakového přívodního potrubí (Main circulation piping, Pressurized surge line). Tvrdost byla měřena po tloušťce obou potrubí a nevykazovala zásadní rozdíly na vnitřním a vnějším povrchu. Průměrná tvrdost vzorku HCP je 180, vzorku TPP pak 182. Grafu průběhu tvrdosti po tloušťce bloků materiálu je znázorněn na Obr. 8 a Obr. 9.



Obr. 8: Tvrdost HV10 na vzorku hlavního cirkulačního potrubí EBO-V1



Obr. 9: Tvrdost HV10 na vzorku tlakového přívodního potrubí EBO-V1

Závěr

Projekt se zaměřuje na specifické výzvy spojené s dlouhodobým provozem (LTO) jaderných elektráren, přičemž zkoumá degradační mechanismy materiálů, jako je bobtnání a tepelné stárnutí. Tyto jevy byly dříve považovány za nepodstatné v kontextu běžného provozu JE, avšak v rámci LTO nabývají na významu. Projekt je zaměřen na technologii reaktorů typu VVER, avšak jeho cílem je také vyvinout metodiky, které lze přizpůsobit pro použití v západních typech reaktorů. Součástí přístupu je integrace nejlepších dostupných technologií a využití nedestruktivních metod pro hodnocení stavu materiálů při mezilaboratorním porovnání vybraných metod pro hodnocení mechanických vlastností a mikrostruktury komponent EBO-V1.

Projekt je za polovinou svého trvání, počáteční přípravné fáze byly úspěšně dokončeny a nyní probíhá experimentální část projektu. V současné době probíhá příprava rozřezových plánů, výroba zkušebních těles, žíhání materiálů, první mechanické zkoušky a mikrostrukturní analýzy.

Reference and acknowledgements

- [1] EUROPEAN COMMISSION. *Project 101061201 — DELISA-LTO*. Directorate-General for Research and Innovation, 2022, 23/5/2022.

POROVNÁNÍ DVOU METOD IN-SITU TAHOVÝCH ZKOUŠEK SIMULUJÍCÍCH VODÍKOVÉ ZKŘEHNUTÍ OCELI 42CRMO4

COMPARISON OF TWO METHODS OF IN-SITU TENSILE TESTS SIMULATING HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF 42CRMO4 STEEL

Pavel Konopík a Jan Zmeko

COMTES FHT a.s., Dobřany, Průmyslová 995

Abstrakt

Poptávka po vodíku v blízké budoucnosti prudce vzroste, protože se jedná o čistý, bezpečný a nákladově efektivní nosič energie. Mnoho různých kovových součástí, jako jsou např. tlakové nádoby, zásobníky, potrubí či ventily, musí být zkonstruovány tak, aby zvládly tlak vodíku. Proto je široký zájem o vývoj cenově přijatelných středně a vysokopevnostních ocelí schopných bezpečně skladovat a přepravovat vodík. Ocel 42CrMo4 je jedním z potenciálních kandidátů pro tyto aplikace. Příspěvek se zaměřuje na dvě in-situ metody pro hodnocení tahových vlastností oceli 42CrMo4 v podmínkách indukujících vodíkovou křehkost.

První metodou jsou in-situ elektrochemické zkoušky, při nichž je zkušební tahové těleso umístěno do zkušebního stroje vybaveného nádobou s elektrolytem. Zkušební těleso je připojeno k anodě a katodě, mezi kterými je indukován elektrický proud.

Druhá zkoumaná metoda zahrnuje tahové zkoušky využívající dutá zkušební tělesa naplněná plynným vodíkem pod tlakem až 200 bar. Tato technika nabízí praktickou alternativu ke standardním zkouškám ve vodíkových autoklávech díky své rychlosti, jednoduchosti a nižším nákladům na provedení. Kromě toho efektivněji simuluje reálné gradienty koncentrace vodíku v potrubních systémech, což zvyšuje relevanci získaných dat.

Abstract

The demand for hydrogen will increase sharply in the near future as it is a clean, safe, and cost-effective energy carrier. Many different metallic components, such as pressure vessels, storage tanks, pipelines, and valves, must be designed to withstand hydrogen pressure. Therefore, there is widespread interest in developing cost-effective medium- and high-strength steels capable of safely storing and transporting hydrogen. Steel 42CrMo4 is one of the potential candidates for these applications. This paper focuses on two in-situ methods for evaluating the tensile properties of 42CrMo4 steel under conditions that induce hydrogen embrittlement.

The first method involves in-situ electrochemical tests where the test tensile specimen is placed in a testing machine equipped with an electrolyte container. The sample is connected to the anode and cathode, between which an electric current is induced.

The second method studied involves tensile tests using hollow specimens filled with gaseous hydrogen under pressures up to 200 bar. This technique offers a practical alternative to standard tests in hydrogen autoclaves due to its speed, simplicity, and lower costs. Additionally, it more effectively simulates real hydrogen concentration gradients in pipeline systems, enhancing the relevance of the obtained data.

Úvod

Degradace materiálů provozovaných konstrukcí a zařízení je stěžejním tématem všech provozovatelů jako je např. ČEPS, či ČEZ. Ať už se jedná např. o stožárové konstrukce vystavené povětrnostnímu prostředí, nebo jsou to součásti v kontaktu s vodíkovým prostředím, je vždy nezbytné tyto jevy prozkoumat a pochopit jejich vliv tak, aby se zamezilo nežádoucí ztrátě provozuschopnosti. Jedním z moderních a nastupujících trendů jsou tzv. čisté technologie pracující buď s plynným či kapalným vodíkem, nebo je zde vodík zastoupen v nějaké

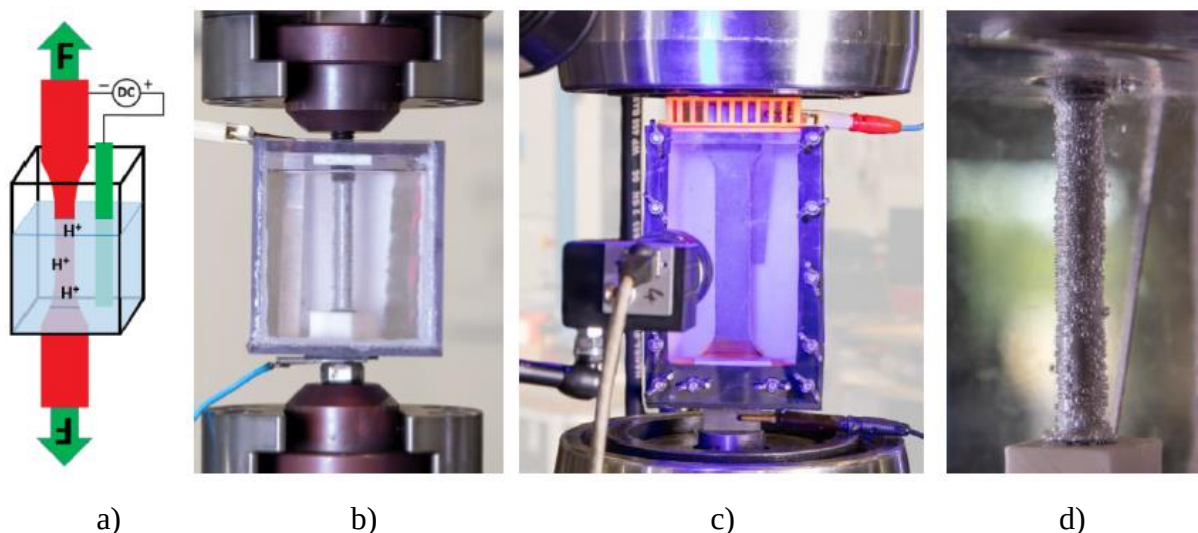
sloučenině. Součásti, jako jsou tlakové nádoby, armatury, ventily a elektrolyzéry, musí být navrženy tak, aby tomuto prostředí odolávaly. Pro zachování ekonomičnosti při návrhu materiálu existuje široký zájem o vývoj nákladově efektivních materiálů střední a vysoké pevnosti, které jsou schopné bezpečně uchovávat a přepravovat vodík. Tento článek zkoumá dvě zkušební metody pro měření mechanických vlastností v prostředích, která způsobují vodíkovou křehkost materiálů. Pro určení účinků vodíkové křehkosti byl použit ocelový materiál 42CrMo4, který je předmětem mnoha jiných studií, např. [1-7].

Experiment

Vodíkové prostředí bylo vytvořeno pomocí dvou metod. První metoda je založená na elektrolytickém sycení zkušební tělesa. Druhá metoda je založena na principu difúze plynného vodíku při zvýšeném tlaku uvnitř dutého zkušební tělesa. Zkušební tělesa byla v těchto prostředí podrobena tahovým zkouškám.

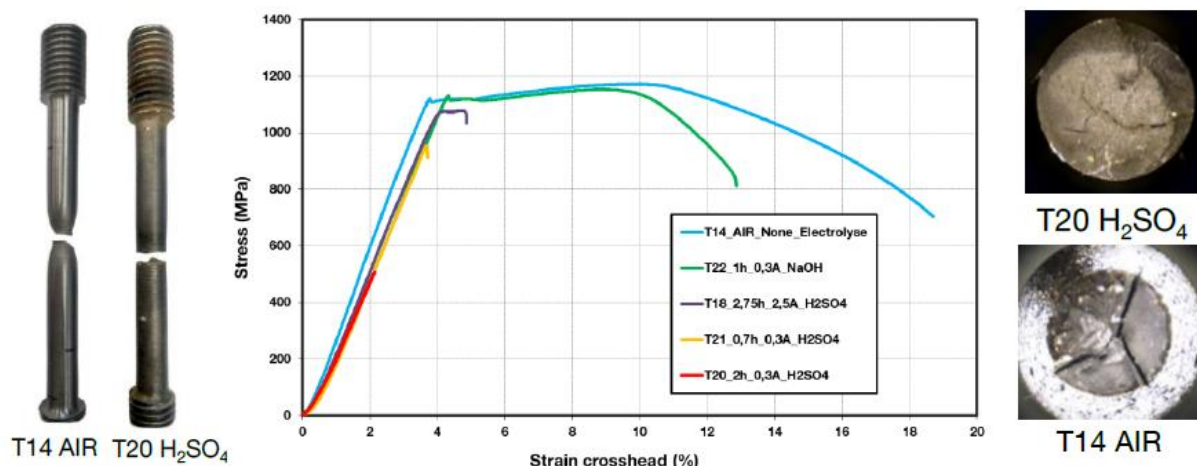
Elektrolytické testování

Jedná se o elektrolytické testy in-situ, které simulují prostředí elektrolyzérů pro výrobu vodíku. Při této metodě je zkušební tahové těleso umístěno do zkušebního stroje vybaveného nádobou na elektrolyt. Během testování slouží těleso jako katoda a jako anoda je použita elektroda z platiny (Pt). Procházením stejnosměrného proudu přes elektrolyt dochází k tvorbě vodíku na zkušebním tělese a jeho současné saturaci vodíkem. Obr. 1 znázorňuje měřicí řetězec s několika příklady kulatého a plochého zkušební tělesa.

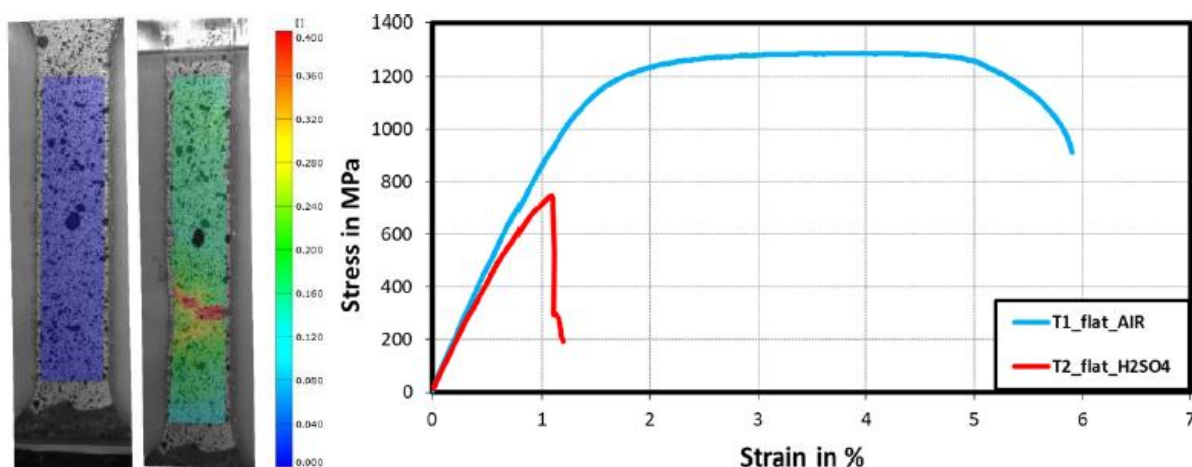


Obr. 1: Tahové těleso umístěno do zkušebního stroje vybaveného nádobou na elektrolyt; a) – schéma měřicího řetězce, b), c) – tělesa v nádobě, c) – detail tělesa během zkoušky

Kulaté zkušební těleso mělo průměr 8 mm a ploché těleso průřez 2 x 12,5 mm. Výsledky zkoušky jsou uvedeny na Obr. 2. Graf T14, ukazuje základní chování zkoumané ocele, s mezí pevnosti 1170 MPa a tažnosti 17 %. V prostředí NaOH při 0,3 A po dobu 1 hod tažnost klesla na 11 % při zachování pevnosti. V roztoku H₂SO₄ se jako nejprogresivnější ukázalo sycení po dobu 2 hod při aplikovaném proudu 0,3 A. T20, praskl hluboko v elastické oblasti při pevnosti 500 MPa, což je jen 43 % původních vlastností této oceli. Porovnání charakteru lomů pro tělesa T14 a T20 jsou zobrazeny též na Obr. 2 a charakter lomu odpovídá pracovnímu tahovému diagramu. Tahové chování plochých zkušebních těles vykazovalo stejný trend a výhoda této geometrie spočívá ve snadnější obrazovém zpracování pomocí DIC (Digital Image Correlation), která zobrazuje plné pole deformací během zkoušky, viz Obr. 3.



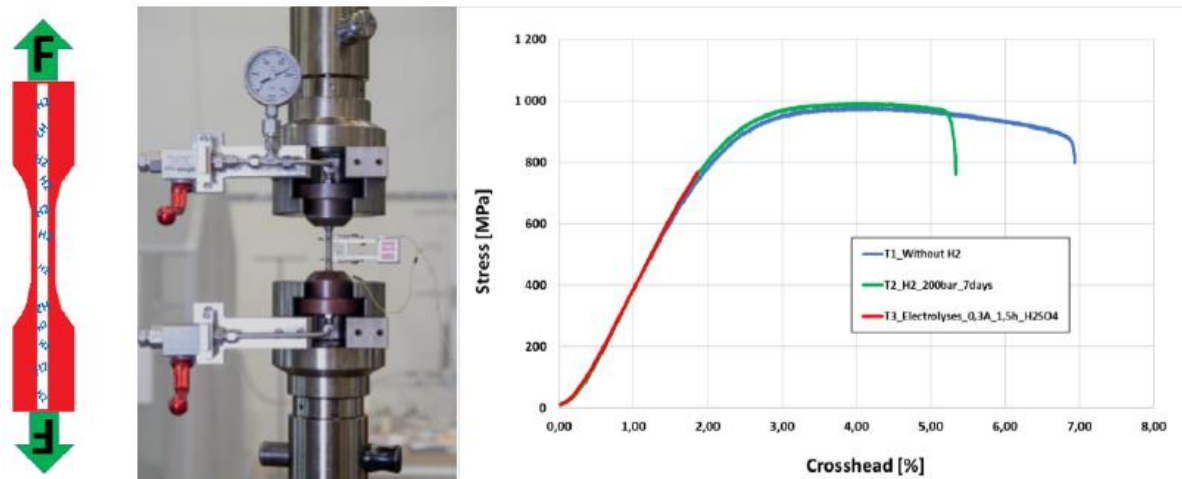
Obr. 2: Výsledky tahových zkoušek kulatých těles v elektrolytickém prostředí



Obr. 3: Výsledky tahových zkoušek v plochých těles elektrolytickém prostředí vč. DIC

Dutá tělesa s přetlakem plynného vodíku

Druhá studovaná metoda zahrnuje tahové zkoušky s použitím dutých zkušebních těles naplněných plynným vodíkem při tlacích až do 200 barů. Tato metoda simuluje účinky vodíkové křehkosti v tlakových nádobách a armaturách. Realisticky simuluje gradienty koncentrace vodíku ve stěnách tlakových nádob a potrubních systémů, což zvyšuje relevanci získaných dat. Bylo použito duté těleso o průměru 6,25 mm vnější zkušební části a průměru 2,0 mm vnitřní díry. Před samotným napuštěním plynným vodíkem bylo provedeno propláchnutí a poté bylo těleso ponecháno působení vodíku při tlaku 200 bar po dobu 7 dní. Schéma sestavy a výsledné tahové diagramy jsou vyobrazeny na Obr. 4.



Obr. 4: Schéma sestavy a výsledky tahových zkoušek dutých těles

Závěr

Během výzkumu bylo zjištěno, že elektrolytické prostředí způsobuje výrazně vyšší vodíkové zkrěhnutí oceli 42CrMo4. Elektrolytické prostředí s vodíkem dokáže způsobit během relativně krátké doby velké snížení tažnosti a pokles pevnosti materiálu. Toto zjištění může být klíčové pro dimenzování elektrolyzérů.

Naopak u prostředí s plynným vodíkem se ukázalo, že proces vodíkového zkrěhnutí probíhá mnohem pomaleji.

Je snaha více využívat vodík jako ekologickou alternativu, ale rizika vodíkového křehnutí materiálů mohou ohrozit jejich spolehlivost. Je proto nezbytné zaměřit se na tuto problematiku a najít způsoby ochrany materiálů vůči vlivu vodíkového křehnutí.

Poděkování

Tento článek je spolufinancován ze státního rozpočtu Technologickou agenturou České republiky v rámci programu THETA, projekt TK05020115, Nedestruktivní metody pro odhalování skrytých materiálových vad stožárových konstrukcí přenosové soustavy.

Literatura

- [1] TRAUTMANN, Anton - MORI, Gregor - OBERNDORFER, Markus - BAUER, Stephan - HOLZER, Christoph - DITTMANN, Christoph. Hydrogen Uptake and Embrittlement of Carbon Steels in Various Environments. *Materials*, August 2020, vol. 13, no. 16, paper 3604, doi: 10.3390/ma13163604
- [2] IMDAD, Atif - ZAFRA, Alfredo - ARNIELLA, Victor - BELZUNCE, Javier. Hydrogen Diffusivity in Different Microstructures of 42CrMo4 Steel. *Hydrogen*, 2021, vol. 2, no. 4, p. 414-427, doi: 10.3390/hydrogen2040023
- [3] IMDAD, Atif - ARNIELLA, Victor - ZAFRA, Alfredo - BELZUNCE, Javier. Tensile Behaviour of 42CrMo4 Steel Submitted to Annealed, Normalized, and Quench and Tempering Heat Treatments with In-Situ Hydrogen Charging. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 50, p. 270-280, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.082
- [4] ZAFRA, Alfredo - BELZUNCE, Javier - RODRÍGUEZ, Carlos - FERNÁNDEZ-PARIENTE, Iván. Hydrogen Embrittlement of the Coarse Grain Heat Affected Zone of a Quenched and Tempered 42CrMo4 Steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, p. 16890-16908, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.097
- [5] ZAFRA, Alfredo - PERAL, Luis B. - BELZUNCE, Javier - RODRÍGUEZ, Carlos. Effect of Hydrogen on the Tensile Properties of 42CrMo4 Steel Quenched and Tempered at

Different Temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 17, p. 9068-9082, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.158

- [6] PERAL, L.B. - DÍAZ, A. - ARNIELLA, V. - BELZUNCE, J. - ALEGRE, J.M. - CUESTA, I.I. Influence of hydrogen on the hydraulic fracture behavior of a 42CrMo4 steel welds: Effect of the prior austenite grain size. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, vol. 289, paper 109414, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109414
- [7] ZAFRA, Alfredo - ÁLVAREZ, G. - BELZUNCE, Javier - ALEGRE, J.M. - RODRÍGUEZ, Carlos. Fracture Toughness of Coarse-Grain Heat Affected Zone of Quenched and Tempered CrMo Steels with Internal Hydrogen: Fracture Micromechanisms. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, vol. 241, paper 107433, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107433

REJSTŘÍK AUTORŮ

A

Aišman David, 7, 107
Antoš Jakub, 33

B

Brabec Petr, 173
Bricín David, 13
Brom Jaroslav, 93

C

Cizner Josef, 19
Cvešper David, 143
Cvešpr Pavel, 35

D

Dobrev David, 173
Dopjera Daniel, 119
Duliškovič Josef, 7
Dvořák Jiří, 1, 55, 61

F

Fedoriková Alica, 87
FencI Zdeněk, 185
Fikrlová Růžena, 107
Frýbort Otakar, 79
Fulín Zdeněk, 137

G

Gál Petr, 171
Gávelová Petra, 185

H

Halodová Patricie, 87
Hrdličková Kateřina, 87
Hruška Jan, 19
Huptych František, 147

Ch

Chmela Tomáš, 67, 159
Chvostová Eva, 67

J

Jirková Hana, 7
Joanidisová Michaela, 167, 173

K

Kabátová Jitka, 159
Kahoun Hejhalová Jitka, 179
Kasl Josef, 7, 107
Kašpar Vlastislav, 173
Kepka Jr. Miloslav, 43
Kepka Miloslav, 43
Klaisnerová Jitka, 87
Klatovská Petra, 185
Klíma Tomáš, 103
Konopík Pavel, 67, 191
Kopřiva Radim, 185
Kozáková Veronika, 185
KráI Petr, 1, 55, 61
Krejčí Jakub, 1, 159
Kropec Miroslav, 173
Kříž Vojtěch, 153
Kuběna Ivo, 61
Kuchařová Květa, 1, 55
Kůs Pavel, 167
Kvapilová Marie, 1, 55, 61

Kytka Miloš, 179

L

Listík Matěj, 165

M

Mareš Pavel, 25, 49
Matulová Michaela, 173
Melichar Tomáš, 79

N

Nacházel Zdeněk, 97

O

Ohanková Marie, 55

P

Pěnkava Milan, 179
Pilsová Lucie, 67
Pištora Vladislav, 165
Plíhal Ondřej, 143

R

Randák Filip, 147

S

Schmidt Filip, 117
Schnablová Ivana, 185
Skála Ondřej, 115
Sklenička Václav, 1, 55, 61
Sobek Kamil, 87
Soukup Tomáš, 125
Soukupová Witolda, 179
Srba Ondřej, 87
Steiner Vít, 19
Strejcius Josef, 13, 137

Š

Šachlová Šárka, 173
Šárek Petr, 159
Šípová Monika, 167
Špirit Zbyněk, 13, 137
Štemberk Petr, 87
Šulák Ivo, 61

T

Tomas Jiří, 71
Trojan Tomáš, 131

U

Urbánek Adam, 173

V

Vávrovcová Zuzana, 173
Večerník Petr, 173
Veselá Jana, 25, 49, 93
Veselka Zbyněk, 173
Vrtílková Věra, 1

W

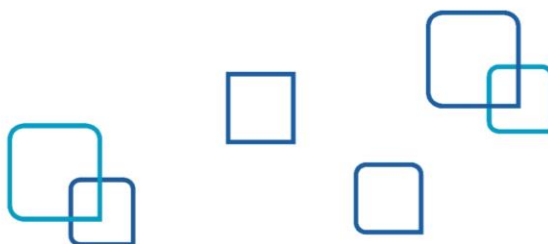
Wessely Andreas, 97

Z

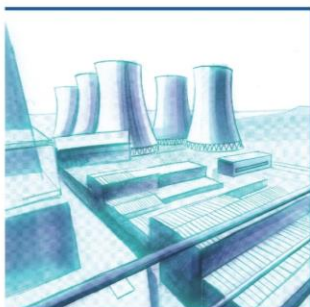
Zahrádka Pavel, 93
Zmeko Jan, 191

Ž

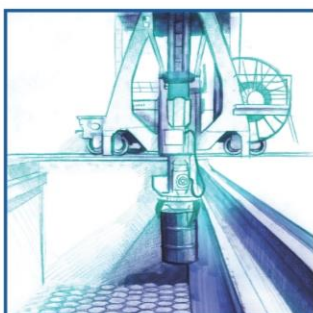
Žďárek Jiří, 81
Živný Petr, 93



**Bezpečný
a efektivní
provoz
energetických
zařízení**



**Projektování
a související
inženýrské
služby**



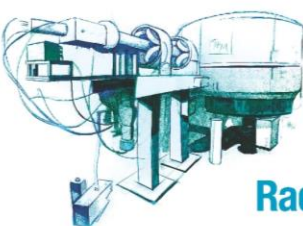
**Nakládání
s radioaktivními
i dalšími
odpady**



**Vyřazování
jaderných
zařízení
z provozu**



**Vodíkové
technologie**

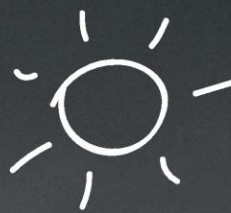


Radiofarmaka



ČEZ ESCO

- komplexnost
- inovace
- úspora
- odbornost



Chytrá budoucnost vaší společnosti

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

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

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

www.cezesco.cz



ČEZ ESCO

**ENERGY
SERVICE
COMPANY**



Centrum výzkumu Řež

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

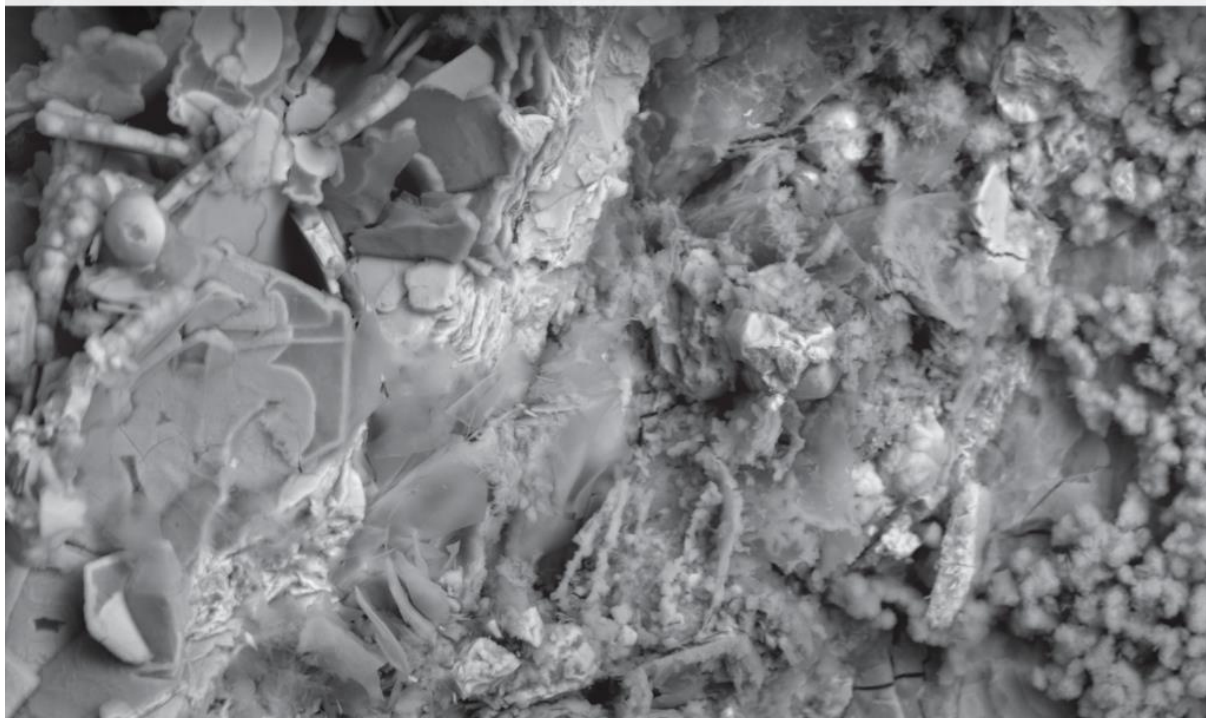
Výzkumná organizace zaměřená na výzkum, vývoj a inovace
v oboru energetiky, zejména jaderné.

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. **výrovnávací 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.ecolindustrial.cz



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

Olejového hospodářství, outsourcingu mazacích služeb, tribodiagnostiky a průmyslového čištění

Hydrodynamické čištění

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

Servis olejových a hydraulických systémů

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

Chemické čištění, konzervace

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

Ecol Fluid Management – outsourcing mazání

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

Tribodiagnostika a poradenství

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

ICML 55.1 ready – implementace Lubrication Managementu



Ecol certifikáty a ocenění:



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



UnionOcel

Váš ocelový partner

Otěruvzdorné plechy

Plech, výpalky
a komponenty
300–600 HB

DUROSTAT
DILLIDUR
XAR

CREUSABRO
BRINAR 400Cr
QUARD
X120 Mn 12

toughcore®
DUROSTAT 400/450

Speciální
návarové materiály
650–1000 HV
CORODUR

Vše z našeho
skladového
a servisního centra
v Kopřivnici



www.unionocel.com



Člen federace evropských materiálových společností – FEMS

<http://www.csnmt.cz>

Zaměření činnosti a cíle společnosti

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

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

Odborné tematické oblasti

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

Organizační uspořádání společnosti

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

Hlavní trvalé aktivity

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

Mezinárodní spolupráce

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

Sídlo ČSNMT

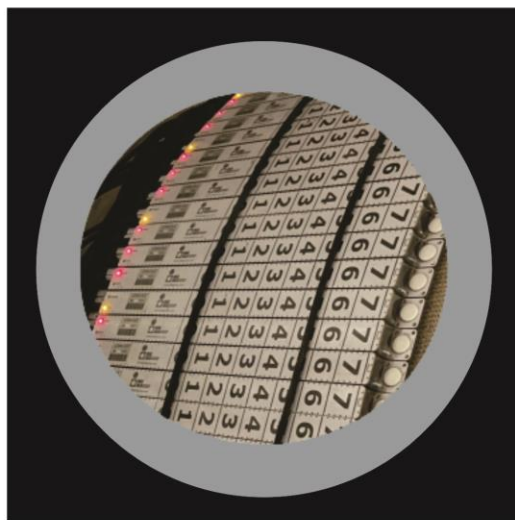
Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1
tel./fax: 221082329, e-mail: csnmt@csnmt.cz

NDT KRITICKÉ INFRASTRUKTURY?

Přes více než 35 let, BEM™ inspekce poskytuje základní informaci pro predikci životnosti infrastruktur.
Diagnostika metodou FAST™, se 100% plošným pokrytím, přináší kompletní vzhled do stěn posuzovaných konstrukcí či zařízení a není omezená statistickým výpočtem životnosti z jednotlivých oddělených, diskrétních bodů.

BE BEM™ SURE.

www.rocksolidgroup.com
ndt@rocksolidgroup.com.au
+420 732 631 930



ACCURATE PATENTED COVERS 100%
TRULY NON-DESTRUCTIVE

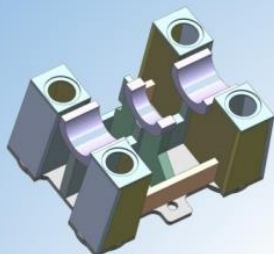


FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

REGIONÁLNÍ
TECHNOLOGICKÝ
INSTITUT

REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT

VÁŠ PARTNER PRO VĚDU, VÝZKUM A SPOLUPRÁCI



Digitální inženýring

Aditivní výroba

Materiálové inženýrství

Silniční vozidla

Kolejová vozidla

Strojírenství



Laboratoř pro virtuální prototyping

Laboratoř kovové aditivní výroby

Metalografická laboratoř

Laboratoř experimentálního tváření

Mechanická zkušebna

Zkušebna provozní pevnosti a únavové životnosti

Laboratoř strojírenských experimentálních metod

Laboratoř technologie obrábění

Laboratoř dílenské metrologie



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

T : +420 377 638 701

E : rti@rti.zcu.cz

www.rti.zcu.cz





Nedestruktivní testování materiálů

www.jctservice.cz

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





Inženýrská akademie České republiky

Inženýrská akademie České republiky, z. s. (IA ČR), založená v roce 1995, sdružuje přední odborníky z oblasti technických věd, výzkumu, vývoje, průmyslu i státní správy. Ve své činnosti soustřeďuje potenciál svých členů k podpoře technických věd, technického rozvoje a technického vzdělávání v České republice s cílem přispívat ke zvyšování konkurenceschopnosti České republiky a její ekonomiky a dalšímu rozvoji systému technického vzdělávání.

IA ČR využívá odborné znalosti svých členů k poskytování expertních a poradenských služeb v oblasti technických věd. Aktivita odborných sekcí IA ČR pokrývající celou škálu technických inženýrských oborů a zahrnující konzultace a informační činnost týkající se mimo jiné výzkumu, vývoje a inovací, mezinárodní výzkumné a technologické spolupráce.

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 České republice. V rámci Euro-CASE se podílí na strategickém poradenství pro Evropskou Komisi a další orgány EU.

Inženýrská akademie Vám nabízí své partnerství a spolupráci 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

Kolektiv autorů

Sborník z 19. konference

„Životnost komponent energetických zařízení“

Srní, 15. – 17. října 2024

Západočeská univerzita v Plzni

Vydavatelství

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Sborník editovali: Pavel Polach, Lukáš Stuna

Počet stran: 236

Vydání první

Náklad: 180 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Pavel Polach, Petr Zuna a Martin Krond'ák

ISBN 978-80-261-1224-2

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2024