

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

**ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT
ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ
V ELEKTRÁRNÁCH**

Srní
17. – 19. říjen 2017

Kolektiv autorů

Sborník z 12. konference

„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“

Srní, 17. – 19. říjen 2017

ISBN 978-80-261-0741-5

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2017

ODBORNÍ GARANTI

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

Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc. – VZÚ Plzeň

PROGRAMOVÝ VÝBOR

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

Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc. – VZÚ Plzeň

Ing. Václav Liška, CSc. - VZÚ Plzeň

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

Mgr. Aleš Laciok, MBA – ČEZ, a.s.

Ing. Radovan Šťastný – ČEZ, a. s.

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

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

ORGANIZAČNÍ VÝBOR

Ing. Václav Liška, CSc.

Jana Miksanová - VZÚ Plzeň

Lenka Lopatková – VZÚ Plzeň

GENERÁLNÍ PARTNER



HLAVNÍ PARTNEŘI



 **UnionOcel**



RAP s.r.o.
eo

esi
get it right™



MEDIÁLNÍ PARTNER

all·for **power**

ENERGETIKA

ODBORNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE

ÚTERÝ 17. 10. 2017:

1. ODPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

LTO energetických zařízení

Garant: Prof. Ing. František Hrdlička, CSc.

2. ODPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

LTO energetických zařízení

Garant: Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc.

STŘEDA 18. 10. 2017

1. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

Vliv koroze a vliv technologie svařování na materiál

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

2. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

Technologické a materiálové novinky

Garant: Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.

ČTVRTEK 19. 10. 2017

1. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

Výstupy z projektů VaV

Garant: Ing. Radovan Štastný

2. DOPOLEDNÍ BLOK PŘEDNÁŠEK

Výstupy z projektů VaV

Garant: Ing. Václav Liška, CSc.

PŘEDMLUVA

Vážení účastníci 12. ročníku konference s názvem „Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“, vážené dámy, vážení pánové,

je to až neuvěřitelné, že se v tak hojném počtu setkáváme zde na Srní již po dvanácté. Možná si někteří říkají, že oblast energetiky je obor konzervativní. Ano, je pravda, že energetika je obor konzervativní, ale to je dáno především bezpečností provozu energetických zařízení. A proto tu jsme, protože celou konferencí se line téma bezpečnosti energetických zařízení, či prodlužování životnosti těchto zařízení.

Rád bych touto cestou poděkoval všem partnerům, kteří podpořili možnost pořádání této úspěšné konference a také všem, kteří přiložili ruku k dílu, aby vše bylo a proběhlo tak, jako vždy, ke spokojenosti Vás účastníků.

Přeji vám příjemný pobyt a mnoho zajímavých odborných zážitků.

Jménem programového výboru

Václav Liška

PROGRAM KONFERENCE

Úterý, 17. října

Registrace účastníků v hotelu Srní u recepcce, 8.00 – 18.00

Oběd v hotelu Srní, 11.15 – 12.15

Zahájení konference (sál v hotelu Šumava), 12.30

Liška V.,
Zuna P.,
Křížek K.
Martínek S.

Úvod a zahájení konference

Zuna P.
13.00 – 13.15

Aktuální otázky aplikovaného výzkumu v ČR

1. odpolední blok přednášek – Hrdlička František (ČVUT v Praze, FS), 13.15 – 15.30

13.15 – 13.35

Prezentace společnosti ÚJV Řež, a.s.

Wandrol J.
13.35 – 13.50

Technickoekonomické studie dlouhodobého provozu (LTO) JE Dukovany a Temelín -
technická část

Pluhař D.
13.50 – 14.05

Technickoekonomické studie LTO JE Dukovany – ekonomická část, riziková analýza,
výstupy a závěry

Rotbauer T.
14.05 – 14.20

Technickoekonomické studie dlouhodobého provozu (LTO) JE Temelín

Ertl J.
14.20 – 14.35

Program řízeného stárnutí pro riziková místa se svarovými spoji (PŘS RMSS)
jaderných elektráren

Konop R.
14.35 – 14.50

Jaderné opravárenství hlavních komponent jaderných elektráren typu VVER v
českých podmínkách s důrazem na opravy svařováním

Lopoš I.
14.50 – 15.05

Analýza účinkov teplotnej stratifikácie monitorovanej systémom MONEZ pri hodnotení
životnosti potrubných komponentov primárneho okruhu

Žďárek J.
15.05 – 15.20

Současný stav projektu HORIZON 2020 IVMR (Udržení roztaveného Coria uvnitř
tlakové nádoby VVER 1000)

Diskuse k předneseným příspěvkům, 15.20 – 15.30

Občerstvení, 15.30 – 15.45

2. odpolední blok přednášek – Balda Miroslav (VZÚ Plzeň), 15.45 – 17.45

15.45 – 16.05

Prezentace společnosti EUTIT s.r.o.

Fiedler J.
16.05 – 16.20

Příčiny poruch parních turbín

Veselý S.
16.20 – 16.35

Výpočet životnosti některých tepelně namáhaných částí spalovacích turbín

Růžička M.
16.35 – 16.50

Metodika stanovení únavového poškození turbínového rotoru při termomechanické
únavě

Lacza J.
16.50 – 17.05

Metody bezkontaktního optického měření deformací - použití pro únavové zkoušky v
prostředí

Smolík L.
17.05 – 17.20

Pokročilá vibrodiagnostika generátorů

Petelová P.
17.20 – 17.35

Posouzení aplikace regeneračního žíhání v procesu zajištění dlouhodobého provozu
vnitřních částí reaktoru VVER 440

Diskuse k předneseným příspěvkům, 17.35 – 17.45

Slavnostní večeře v hotelu Srní, 18.30

Středa, 18. října

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

1. dopolední blok přednášek – Zuna Petr (ČVUT v Praze, FS, IA ČR), 8.30 – 10.40

Cizner J. 8.30 – 8.45	Vysokoteplotní koroze za vysokých teplot v oxyfuel uhelných kotlích
Kasl J. 8.45 – 9.00	Rozbor korozního napadení lopat Kaplanovy turbíny malé vodní elektrárny
Andreovský J. 9.00 – 9.15	Aktivní snížení rozsahu erozních účinků na ponořené teplosměnné ploše fluidního kotle - Vývoj a provozní nasazení
Ducháček P. 9.15 – 9.30	Heterogenní svarové spoje parních generátorů JE Typu VVER 1000 MW zhotovené přidavným svařovacím materiálem typu Sv-10Ch16N25AM6
Poledna M. 9.30 – 9.45	Vývoj a výroba valivých korozivzdorných ložisek s klecemi z termoplastického polymeru PEEK pro použití v sestavě regulačních pohonů PRO a PRO-M pro JE VVER 440
Brziak P. 9.45 – 10.00	
Slováček M. 10.00 – 10.15	Opravy svařováním turbínových komponent skříní z creepově odolných ocelí
Moravec J. 10.15 – 10.30	Možnosti materiálových měření a experimentálních zkoušek pro oblast energetiky - posouzení vlivu svařovacího procesu na degradaci materiálu

Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.30 – 10.40

Občerstvení, 10.40 – 10.55

2. dopolední blok přednášek – Mentl Václav (ZČU v Plzni, FS), 10.55 – 13.10

10.55 – 11.15	Prezentace společnosti PAPco s.r.o.
Žamboch M. 11.15 – 11.30	Experimentální měření součinitele otěru mezi perem a drážkou ve spodní části tlakové nádoby reaktoru VVER 440/213 a VVER 1000/320
Kratochvíl L. 11.30 – 11.45	Výroba vzorků pro experimentální ověření součinitele otěru pera tlakové nádoby reaktoru a drážky šachty reaktoru VVER 440/213 a VVER 1000
Polach P. 11.45 – 12.00	Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu
Janovec J. 12.00 – 12.15	Zvyšování životnosti komponent uhelných elektráren a spaloven užitím NiCr termálních metalických nástřiků
Horváth L. 12.15 – 12.30	Použití plátových trubek na kritická místa kotlů pro energetiku
Chvostová E. 12.30 – 12.45	Analýza mechanických vlastností komponent v provozu pomocí miniaturizovaných zkušebních těles
Vít J. 12.45 – 13.00	35 let automatizovaného nedestruktivního zkoušení TNR typu VVER

Diskuse k předneseným příspěvkům, 13.00 – 13.10

Oběd v hotelu Srní, 13.15 – 14.15

Večeře, společenský večer v sále hotelu Srní
(bowlingový turnaj o pohár ředitele společnosti VZÚ Plzeň) – od 18.30

Čtvrtek, 19. října

Snídaně v hotelu Srní, 7.15 – 8.15

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

Marková J. 8.30 – 8.45	Stavebně technické průzkumy betonových konstrukcí v elektrárnách
Zajíček J. 8.45 – 9.00	Počty náhradních dílů s ohledem na jejich kritičnost a dobu dodání
Kobzová A. 9.00 – 9.15	Řízení chemického režimu parovodního okruhu dle doporučení EPRI vs. VGB
Suchanová H. 9.15 – 9.30	Mikrobiální smyčka - dlouhodobý test pro EPRI
Švantner M. 9.30 – 9.45	Metody aktivní termografie pro prediktivní údržbu energetických zařízení
Junek M. 9.45 – 10.00	Mechanické a strukturní vlastnosti orbitálních svarových spojů z ocelí P91 a P92 po dlouhodobé laboratorní degradaci za zvýšených teplot
Brabec P. 10.00 – 10.15	Silikonové repliky - nepřímá metoda hodnocení poškození komponent
Cvešpr P. 10.15 – 10.30	LTOS - Podpora pro řízení životnosti zařízení

Diskuse k předneseným příspěvkům, 10.30 – 10.45

Občerstvení, 10.45 – 11.00

2. dopolední blok přednášek – Liška Václav (VZÚ Plzeň), 11.00 – 12.30

Svobodová M. 11.00 – 11.15	Posun přechodové teploty vrubové houževnatosti oceli P92 během teplotní expozice
Černý M. 11.15 – 11.30	Posouzení korozní odolnosti dílů parních turbín s využitím lomové mechaniky
Strejc J. 11.30 – 11.45	Stanovení korozně únavových vlastností na miniaturizovaných zkušebních tělesech
Horváth J. 11.45 – 12.00	Vliv laboratorní teplotní expozice na způsob mechanického porušování austenitické oceli HR3C
Neumannová Š. 12.00 – 12.15	Mechanické vlastnosti martenzitické ocele CB2

Diskuse k předneseným příspěvkům a Ukončení konference, 12.15 – 12.30

Oběd v hotelu Srní, 12.30 – 13.30

OBSAH

ODBORNÍ GARANTI	iii
PROGRAMOVÝ VÝBOR	iii
ORGANIZAČNÍ VÝBOR	iii
GENERÁLNÍ PARTNER.....	iv
HLAVNÍ PARTNEŘI	iv
MEDIÁLNÍ PARTNER	vi
ODBORNÁ TÉMATA A GARANTI KONFERENCE	vii
PŘEDMLUVA	viii
PROGRAM KONFERENCE	ix
OBSAH	xii
TECHNICKOEKONOMICKÉ STUDIE DLOUHODOBÉHO PROVOZU (LTO) JE DUKOVANY A TEMELÍN – TECHNICKÁ ČÁST.....	1
TECHNICAL ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF DUKOVANY NPP LONG TERM OPERATION – TECHNICAL PART 1	1
JAN WANDROL	1
TECHNICKOEKONOMICKÉ STUDIE LTO JE DUKOVANY (EDU) - EKONOMICKÁ ČÁST, RIZIKOVÁ ANALÝZA, VÝSTUPY A ZÁVĚRY	5
TECHNICAL ECONOMIC STUDY OF LTO DUKOVANY NPP - THE ECONOMIC PART, RISK ANALYSIS, OUTPUTS AND CONCLUSIONS.....	5
DUŠAN PLUHAŘ	5
PROGRAM ŘÍZENÉHO STÁRNUTÍ PRO RIZIKOVÁ MÍSTA SE SVAROVÝMI SPOJI (PŘS RMSS) JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	9
AGEING MANAGEMENT PROGRAM FOR RISK WELDS (AMP RMSS) OF NUCLEAR POWER PLANTS	9
JAKUB ERTL.....	9
JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ HLAVNÍCH KOMPONENT JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER V ČESKÝCH PODMÍNKÁCH S DŮRAZEM NA OPRAVY SVAŘOVÁNÍM	13
REPAIR OF WWER TYPE NUCLEAR POWER PLANT MAIN NUCLEAR COMPONENTS IN CZECH CONDITIONS WITH EMPHASIS ON WELD REPAIRS.....	13
TOMÁŠ SOUKUP A RADEK KONOP	13
ANALÝZA ÚČINKOV TEPLOTNEJ STRATIFIKÁCIE MONITOROVANEJ SYSTÉMOM MONEZ PRI HODNOTENÍ ŽIVOTNOSTI POTRUBNÝCH KOMPONENTOV PRIMÁRNEHO OKRUHU.....	19
ANALYSIS OF THERMAL STRATIFICATION EFFECTS MONITORED BY SYSTEM MONEZ IN LIFETIME EVALUATION OF PRIMARY CIRCUIT PIPING COMPONENTS.....	19
IVAN LOPOŠ, MILAN MIKUŠ A MARIÁN KRAJČOVIČ.....	19
SOUČASNÝ STAV PROJEKTU HORIZON 2020 IVMR (UDRŽENÍ ROZTAVENÉHO CORIA UVNITŘ TLAKOVÉ NÁDOBY VVER 1000).....	23
PRESENT STATUS OF THE HORIZON 2020 IVMR PROJECT (IN VESSEL MELT RETENTION INSIDE THE RPV FOR THE VVER 1000).....	23
JIŘÍ ŽDÁREK, DAVID BÁTĚK A SVATOPLUK VLČEK	23
PŘÍČINY PORUCH PARNÍCH TURBÍN	27
CAUSES OF STEAM TURBINE MALFUNCTION	27

JAN FIEDLER.....	27
VÝPOČET ŽIVOTNOSTI NĚKTERÝCH TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ČÁSTÍ SPALOVACÍCH TURBÍN.....	31
STANISLAV VESELÝ.....	31
METODIKA STANOVENÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ TURBÍNOVÉHO ROTORU PŘI TERMOMECHANICKÉ ÚNAVĚ	37
THERMOMECHANICS FATIGUE DAMAGE METHODOLOGY OF THE TURBINE ROTOR.....	37
MILAN RŮŽIČKA, JOSEF JURENKA, MARTIN NESLÁDEK, MAXIM LUTOVINOV, PETR MĚŠŤÁNEK A JAN DŽUGAN.....	37
METODA BEZKONTAKTNÍHO OPTICKÉHO MĚŘENÍ DEFORMACÍ - POUŽITÍ PRO ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY V PROSTŘEDÍ.....	41
CONTACTLESS OPTICAL METHOD FOR DEFORMATION MEASUREMENT - APPLICATION FOR FATIGUE TESTING IN ENVIRONMENT	41
JAKUB LACZA A MIROSLAVA ERNESTOVÁ	41
POSOUZENÍ APLIKACE REGENERAČNÍHO ŽIHÁNÍ V PROCESU ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440	45
RECOVERY ANNEALING APPLICATION ASSESSMENT IN THE PROCESS OF WWER 440 TYPE REACTOR INTERNALS LONG-TERM OPERATION	45
PETRA PETELOVÁ, ONDŘEJ BURŠÍK, VÁCLAV NOVÁK, BARBORA MAREŠOVÁ, RADIM KOPŘIVA A ALEŠ MATERNA	45
VYSOKOTEPLTNÍ KOROZE V OXYFUEL UHELNÝCH KOTLÍCH.....	49
HIGH TEMPERATURE CORROSION IN OXYFUEL COAL-FIRED BOILERS.....	49
JOSEF CIZNER, JAN HRUŠKA A JAKUB MLNAŘÍK	49
ROZBOR KOROZNÍHO NAPADENÍ LOPAT KAPLANOVY TURBÍNY MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	53
THE ANALYSIS OF CORROSION ATTACK OF BLADES OF SMALL WATER POWER STATION	53
JOSEF KASL, JAKUB HORNÍK, JANA PECHAROVÁ, MIROSLAVA MATĚJOVÁ, STANISLAV KRUM A PETR ZUNA.....	53
AKTIVNÍ SNÍŽENÍ ROZSAHU EROZNÍCH ÚČINKŮ NA PONOŘENÉ TEPLOSMĚNNÉ PLOŠE FLUIDNÍHO KOTLE - VÝVOJ A PROVOZNÍ NASAZENÍ.....	57
ACTIVE REDUCING EXTEND OF EROSION ON THE IMMERSED HEAT EXCHANGE SURFACE IN FLUIDIZED BOILER – DEVELOPMENT AND REAL OPERATION.	57
JAN ANDREOVSKÝ A PETR MAREŠ.....	57
HETEROGENNÍ SVAŘOVÉ SPOJE PARNÍCH GENERÁTORŮ JE TYPU VVER 1000 MW ZHOTOVENÉ PŘÍDAVNÝM SVAŘOVACÍM MATERIÁLEM TYPU SV-10CH16N25AM6	63
PETR DUCHÁČEK, MAREK PALÁN A ZDENĚK ČANČURA	63
VÝVOJ A VÝROBA VALIVÝCH KOROZIVZDORNÝCH LOŽISEK S KLECEMI Z TERMOPLASTICKÉHO POLYMERU PEEK PRO POUŽITÍ V SESTAVĚ REGULAČNÍCH POHONŮ PRO A PRO-M PRO JE VVER 440.	67
DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF ROLLING BEARINGS MADE OF STAINLESS STEELS WITH CAGES MADE OF THERMOPLASTIC POLYMER PEEK FOR USAGE IN NUCLEAR REACTOR VVER 440 CONTROL ROD DRIVE MECHANISM PRO AND PRO-M GROUP.	67
MARTIN POLEDNA	67
OPRAVY SVAŘOVÁNÍM TURBÍNOVÝCH KOMPONENT SKŘÍNÍ Z CREEPOVĚ ODOLNÝCH OCELÍ.....	71
WELDING REPAIR OF TURBINE COMPONENT FROM CREEP RESISTANCE STEELS	71
MAREK SLOVÁČEK, JOSEF TEJC, TOMÁŠ RICHTER, JAROMÍR MORAVEC, DAVID BERAN A JAN ČECH.....	71
MOŽNOSTI MATERIÁLOVÝCH MĚŘENÍ A EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK PRO OBLAST ENERGETIKY - POSOUZENÍ VLIVU SVAŘOVACÍHO PROCESU NA DEGRADACI MATERIÁLU.....	79

POSSIBILITIES OF THE MATERIALS MEASUREMENTS AND EXPERIMENTAL TESTS IN THE ENERGETICS SECTION – EVALUATION INFLUENCE OF THE WELDING PROCESS ON THE MATERIAL DEGRADATION	79
JAROMÍR MORAVEC A IVA NOVÁKOVÁ	79
EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SOUČiniteLE OTĚRU MEZI PEREM A DRÁŽKOU VE SPODNÍ ČÁSTI TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU VVER 440/213 A VVER 1000/320	83
EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FRETTING WEAR COEFFICIENT BETWEEN THE KEY AND THE GROOVE IN THE LOWER PART OF THE VVER 440/231 AND VVER 1000/320 REACTOR PRESSURE VESSEL	83
LADISLAV PEČÍNKA, SVOBODA J. A MIROSLAV ŽAMBOCH	83
VÝROBA VZORKŮ PRO EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ SOUČiniteLE OTĚRU PERA TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU A DRÁŽKY ŠACHTY REAKTORU VVER 440/213 A VVER 1000.	87
PRODUCTION OF SAMPLES FOR EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FRETTING WEAR COEFFICIENT BETWEEN THE REACTOR PRESSURE VESSEL KEY AND THE CORE BARREL GROOVE IN THE LOWER PART OF THE VVER 440/213 AND VVER 1000.	87
LIBOR KRATOCHVÍL	87
ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU	91
ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING.....	91
PAVEL POLACH, VÁCLAV ČERNÝ A JAROSLAV VÁCLAVÍK	91
ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT UHELNÝCH ELEKTRÁREN A SPALOVEN UŽITÍM NICR TERMÁLNÍCH METALICKÝCH NÁSTRÍKŮ	97
ENHANCING THE LIFE OF COMPONENTS OF COAL-FIRED POWER PLANTS AND WASTE INCINERATORS USING THERMAL METALLIC NICR SPRAYS	97
JIŘÍ JANOVEC, JAKUB HORVÁTH A MICHAL JUNEK	97
POUŽITÍ PLÁTOVANÝCH TRUBEK NA KRITICKÁ MÍSTA KOTLŮ PRO ENERGETIKU	103
THE CLADDING TUBES FOR THE ENERGETIC BOILER CRITICAL PARTS APPLICATION	103
LADISLAV HORVÁTH, JAKUB HORVÁTH, JIŘÍ JANOVEC.....	103
ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPONENT V PROVOZU POMOCÍ MINIATURIZOVANÝCH ZKŮŠEBNÍCH TĚLES	107
ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES COMPONENT IN OPERATION USING SUB-SIZED SPECIMENS.....	107
EVA CHVOSTOVÁ, JÁN DŽUGAN A PAVEL KONOPÍK	107
35 LET AUTOMATIZOVANÉHO NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ TNR TYPU VVER.....	111
35 YEARS OF AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WWER TYPE REACTOR PRESSURE VESSELS	111
JAN VÍT, LUKÁŠ STAINER A ZDENĚK SKÁLA	111
STAVEBNĚ TECHNICKÉ PRŮZKUMY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ V ELEKTRÁRNÁCH	115
INVESTIGATIONS OF CONCRETE STRUCTURES IN POWER PLANTS.....	115
JANA MARKOVÁ, JAN MLČOCH, MIROSLAV SÝKORA, KAMIL PREŠL A JAN MOLNÁR	115
POČTY NÁHRADNÍCH DÍLŮ S OHLEDEM NA JEJICH KRITICHNOST A DOBU DODÁNÍ	119
NUMBER OF SPARE PARTS DEPENDING ON THEIR CRITICALITY AND DELIVERY TIME	119
JAN KAMENICKÝ, PAVEL SÁGL A JAROSLAV ZAJÍČEK	119
ŘÍZENÍ CHEMICKÉHO REŽIMU PAROVODNÍHO OKRUHU DLE DOPORUČENÍ EPRI VS. VGB.....	123
WATER CHEMISTRY CONTROL OF STEAM/WATER CYCLE SYSTEM BY EPRI VS. VGB GUIDELINES.....	123
ALENA KOBZOVÁ A MARTIN KRONĎÁK.....	123

MIKROBIÁLNÍ SMYČKA – DLOUHODOBÝ TEST PRO EPRI	127
MICROBIAL LOOP – LONG-TERM TEST FOR EPRI.....	127
DALIBOR KÁRNÍK, ALENA KOBZOVÁ, MARTIN KRONĎÁK A HELENA SUCHANOVÁ.....	127
METODY AKTIVNÍ TERMOGRAFIE PRO PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....	131
ACTIVE THERMOGRAPHY METHODS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF POWER EQUIPMENT	131
MICHAL ŠVANTNER, LUKÁŠ MUZIKA, JIŘÍ SKÁLA A JIŘÍ TESAŘ	131
MECHANICKÉ A STRUKTURNÍ VLASTNOSTI ORBITÁLNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ Z OCELÍ P91 A P92 PO DLOUHODOBÉ LABORATORNÍ DEGRADACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	133
MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF NARROW GAP ORBITAL WELDED P91 AND P92 STEELS AFTER LONG-TERM LABORATORY AGEING AT ELEVATED TEMPERATURES	133
MICHAL JUNEK, MARIE SVOBODOVÁ, LADISLAV HORVÁTH A JIŘÍ JANOVEC.....	133
SILIKONOVÉ REPLIKY – NEPŘÍMÁ METODA HODNOCENÍ POŠKOZENÍ KOMPONENT	137
SILICONE REPLICAS – INDIRECT METHOD TO EVALUATE DAMAGE OF COMPONENTS	137
PETR BRABEC	137
LTOS - PODPORA PRO ŘÍZENÍ ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ	141
LTOS - SW SUPPORT TO LIFE CONTROL OF EQUIPMENT	141
PAVEL CVEŠPR.....	141
POSUN PŘECHODOVÉ TEPLoty VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI OCELI P92 BĚHEM TEPLOTNÍ EXPOZICE	145
SHIFT OF IMPACT TRANSITION TEMPERATURE OF P92 STEEL DURING ISOTHERMAL AGEING	145
MARIE SVOBODOVÁ, MICHAL JUNEK, JOSEF ČMAKAL A JINDŘICH DOUDA.....	145
POSOUZENÍ KOROZNÍ ODOLNOSTI DÍLŮ PARNÍCH TURBÍN S VYUŽITÍM LOMOVÉ MECHANIKY	149
CORROSION RESISTANCE EVALUATION FOR STEAM TURBINES BY FRACTURE MECHANICS.....	149
MIROSLAV J. ČERNÝ	149
VLIV LABORATORNÍ TEPLOTNÍ EXPOZICE NA ZPŮSOB MECHANICKÉHO PORUŠOVÁNÍ AUSTENITICKÉ OCELE HR3C	151
THE CHANGES IN FRACTURE MECHANISM OF THE AUSTENITIC STEEL HR3C CAUSED BY ISOTHERMAL LABORATORY AGEING	151
JAKUB HORVÁTH, JIŘÍ JANOVEC A LADISLAV HORVÁTH	151
MECHANICKÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÉ OCELE CB2	155
MECHANICAL PROPERTIES OF MARTENZITIC STEEL CB2	155
ŠÁRKA NEUMANNOVÁ, JAN ČECH, TOMÁŠ VLASÁK, JAN HAKL A LIBUŠE HAVELKOVÁ	155
REJSTRÍK AUTORŮ	159

ČEZ ESCO

- komplexnost
- inovace
- úspora
- odbornost



Chytrá budoucnost vaší společnosti

**ČEZ ESCO nabízí inovativní a chytrá řešení energií
pro firmy i celá města.**

Naše služby vám umožní stát se energeticky nezávislejší a ekologicky odpovědnější. Provedeme detailní audit a na základě jeho výsledku navrhne optimální projekt. Postaráme se o financování, celkovou realizaci i následnou údržbu a servis.

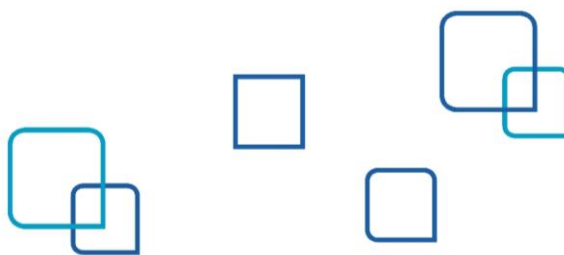
Díky našim zkušenostem a dodávaným technologiím si můžete být jisti, že ČEZ ESCO je investice do budoucna, která přináší chytrá řešení pro vaši společnost.

www.cezesco.cz

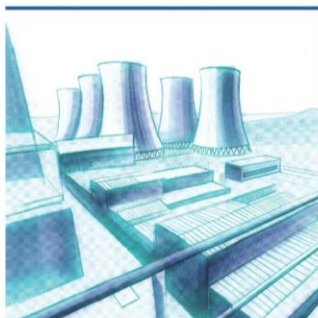


ČEZ ESCO

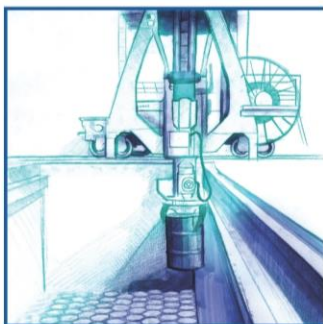
ENERGY
SERVICE
COMPANY



**Bezpečný
a efektivní
provoz
energetických
zařízení**



**Projektování
a související
inženýrské
služby**



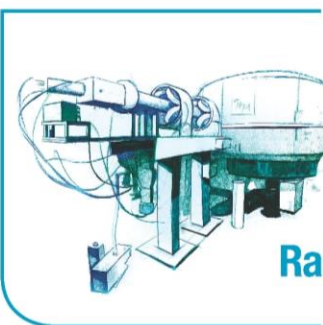
**Nakládání
s radioaktivními
i dalšími
odpady**



**Vyřazování
jaderných
zařízení
z provozu**



**Vodíkové
technologie**

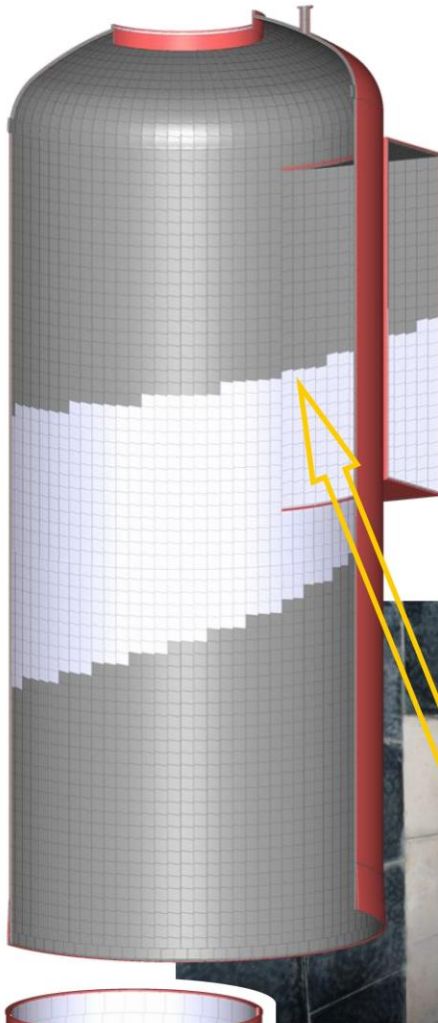


Radiofarmaka





OTĚRUVZDORNÁ POTRUBÍ



EUTIT s.r.o., Slévárna čediče a eucoru, č.p. 196, 353 01 Stará Voda; +420 354 789 150, 119, 130; +420 354 691 480; eutit@eutit.cz

www.eutit.cz

Teplo z Komořan

váš nejdostupnější zdroj tepelné pohody



Ekologické
a bezpečné



Dlouhodobě cenově
dostupné

www.setep.cz

www.ue.cz

ST SEVEROČESKÁ
TEPLÁRENSKÁ

Teplárenská 2,
Most-Komořany

UE UNITED
ENERGY



**TEPLÁRNA
OTROKOVICE**
LAMA energy group

**BEZPEČNÁ
SPOLEHLIVÁ
ENERGIE**

TEPLÁRNA OTROKOVICE a.s.

výroba a rozvod tepla
výroba elektřiny
obchod s elektřinou

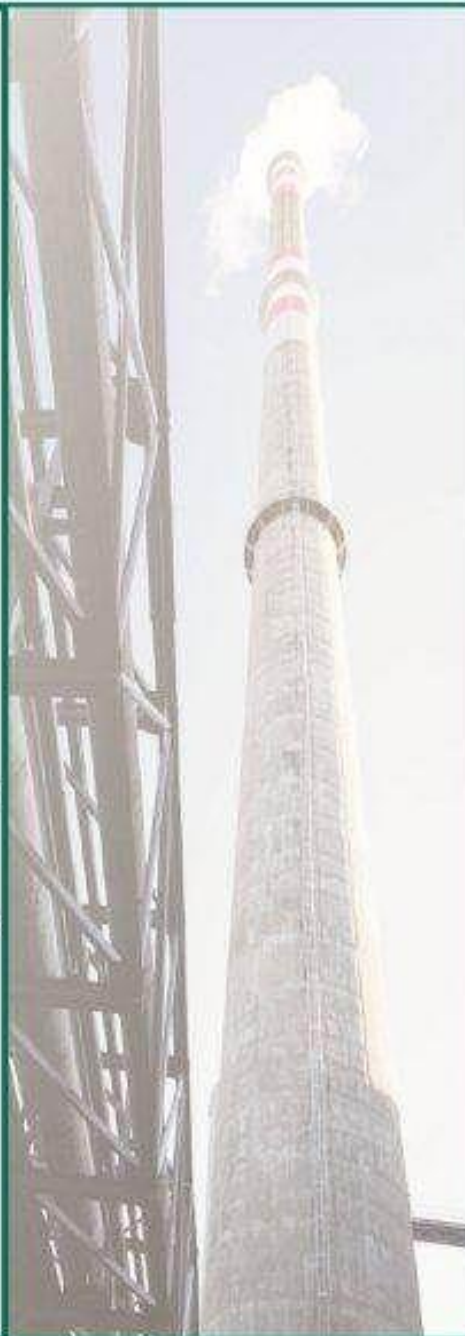
člen skupiny

LAMA ENERGY GROUP

dodavatel plynu
dodavatel elektřiny
mobilní operátor

www.tot.cz

www.lamagroup.cz





UnionOcel

Váš ocelový partner

Skladové a servisní centrum Kopřivnice

Naše možnosti

Plech

Výpalky

plazma do 40 mm
autogen do 330 mm

Opracované díly

Ohraňování

Vrtání

Tryskání

Skružování

Stříhání na nůžkách

Nezávislé přejímky

Zkoušky UZV

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

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

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

E-mail: info@unionocel.cz



www.unionocel.cz



TES s.r.o. | Pražská 597 | 674 01 Třebíč
Tel.: +420 568 838 411 | Fax: +420 568 838 127
E-mail: tes@tes.eu

www.tes.eu



Jsme česká inženýrská společnost a od roku 1992 se specializujeme na inženýrské služby a technickou podporu zejména v oblasti jaderné energetiky. Jsme spolehlivým dodavatelem energetické společnosti ČEZ, jejích partnerů i zahraničních zákazníků. Naší činností podporujeme bezpečnost provozu na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín.

V rámci mezinárodních projektů se podílíme na zlepšení provozu a bezpečnosti jaderných elektráren v Rusku a na Slovensku. Jako vedoucí členové konsorcií jsme získali bohaté zkušenosti v oblasti řízení projektů, např. na projektech TACIS řízených Evropskou komisí nebo naší účastí na projektech organizovaných Ministerstvem obchodu a průmyslu ČR.



ECAD® – diagnostika kabelů



Validace havarijních předpisů na simulátoru EDU



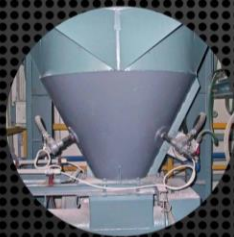
MOSAD®-5 monitorovací systém analogových a dvouhodnotových signálů

Klíčové oblasti našich služeb pro JE:

- Spouštění energetických celků
- Výpočty a bezpečnostní analýzy
- Monitorovací a diagnostické systémy
- Inženýrská podpora provozu JE
- Inženýring elektrických systémů
- Technická podpora jaderného dozoru

Garance plynulého toku sypkých materiálů

Kontinuální čištění pomocí akustické energie



ŘEŠENÍ PRO TĚŽKÝ PRŮMYSL A ENERGETIKU



Společnost MECAS ESI, jako součást ESI Group, je uznávaným světovým dodavatelem nástrojů **počítačové simulace v oblastech návrhu prototypů a výrobních procesů**. Zabývá se řešením komplexních inženýrských projektů a prodejem pokročilého softwaru včetně služeb s tím spojených.

Tým inženýrů MECAS ESI poskytuje **technickou podporu a konzultace** v oblasti provádění multifyzikálních analýz včetně posouzení limitních stavů, simulací nárazových zkoušek, provádění analýz výrobních procesů tváření, lití, svařování, tepelného zpracování, ale také například analýzy vibroakustiky, proudění a elektromagnetické kompatibility.

V odvětví těžkého průmyslu a energetiky poskytuje společnost MECAS ESI služby pro následující oblasti:

Návrh zařízení a oblast řízeného stárnutí energetických komponent

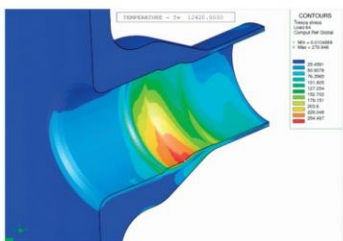
- Statické analýzy v lineární a nelineární oblasti (SYSTUS a VPS*)
- Dynamické analýzy v lineární a nelineární oblasti (SYSTUS a VPS)
- Teplotní analýzy (SYSTUS a VPS)
- Analýzy proudění (OpenFOAM)
- Vibroakustika (VA one)
- Nárazové zkoušky (VPS)
- Posouzení limitních stavů - únava, creep, lomová mechanika (SYSTUS a VPS)
- Interaktivní vizuální rozhodování využívající technologie virtuální reality (IC.IDO)

Výroba & optimalizace výroby

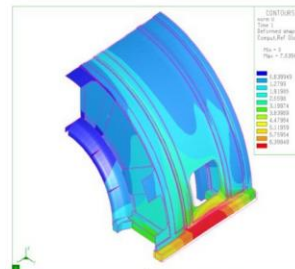
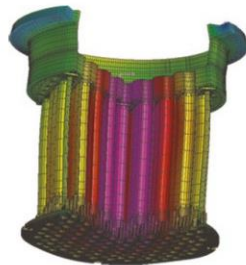
- Odlévání (Pro CAST)
- Svařování (SYSWELD)
- Tepelné zpracování (SYSWELD)
- Objemové tváření (QFORM)
- Plošné tváření (PAM STAMP)
- Ohýbání trubek (PAM TUBE)
- Zobrazení procesů ve 3D (IC.IDO)

*Virtual Performance Solution - původní PAM-CRASH, který je komplexně rozšířen i na implicitní řešení multifyzikálních úloh.

Produkty společnosti ESI Group jsou vzájemně propojitelné, tzn. lze provádět numerické simulace 3. generace, kde jsou zastoupeny jednotlivé výrobní procesy a následně i analýzy provozních stavů, případně limitních stavů.



Se souhlasem COMEX NUCLEAIRE



Se souhlasem ŠKODA POWER a.s.



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, kluby (pobočky) ČSNMT v regionech, instituce Ceny ČSNMT.

Hlavní trvalé aktivity

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

Mezinárodní spolupráce

- Federation of European Materials Societies
- Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM)
- The Institute of Materials, Minerals and Mining Velká Británie
- 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

OLYMPUS®

Your Vision, Our Future



OmniScan MX2 PA2

Ultrazvuková technologie „Phased Array“ a „TOFD“ - možnost využití obou technik současně!

Odolný a snadno přenosný **OmniScan MX2 PA2** s Phased Array modulem druhé generace umožňuje rychlé skenování i záznam dat a nabízí výkonné softwarové funkce pro nedestruktivní zkoušení PA i TOFD. Přináší další výrazný posun v efektivitě zkoušení při zachování preciznosti v pokročilých AUT i ve standardních aplikacích.

Snazší a rychlejší nastavení

Kratší cyklus zkoušení, vyhodnocení i reportování

Vhodné pro:

- defektoskopii tavných svarových spojů
- tlakové nádoby
- zkoušení kompozitů
- svary na trubkách malých průměrů
- manuální a poloautomatické zkoušení
- korozní poškození

Scientific Solutions Division

Olympus Czech Group, s.r.o., člen koncernu,

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6, tel.: +420 221 985 112

info-industrial@olympus.cz

www.olympus-ims.com/en/omniscan-mx2

STARMANS

STARMANS electronics je inženýrská a výrobní společnost, která poskytuje pokročilé technologické produkty a řešení pro nedestruktivní testování a vyhodnocení. Vytváříme, navrhujeme a vyrábíme přenosné ultrazvukové zařízení a systémy pro ultrazvukovou, infračervenou, magneto-práškovou inspekci a X-ray testování.

Telemetrická stanice

DIO 3000 telemetrická stanice



- 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 ultrazvukový defektoskop

Defectobook® DIO1000 PA nyní umožňuje zobrazování v režimu Phased Array vyvinutý a navržený firmou STARMANS.

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,
- 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





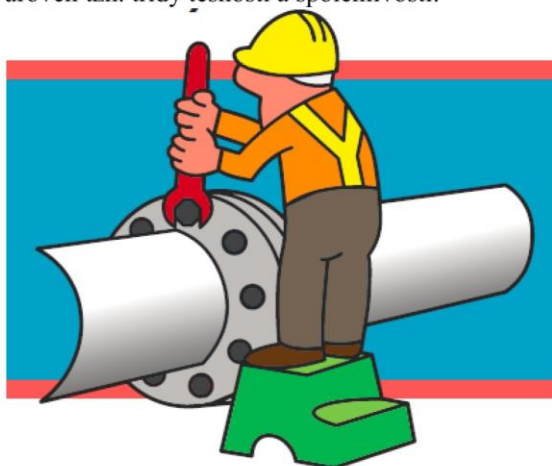
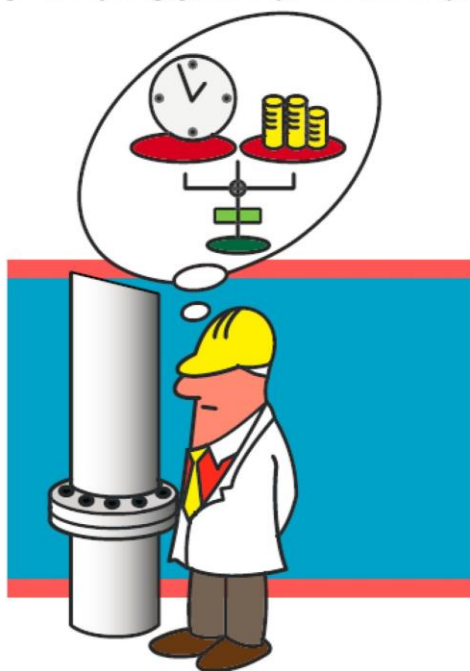
TĚSNĚNÍ & TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

KONZULTACE & ODBORNÉ POSUDKY

VÝPOČTY, ZKOUŠKY, KVALIFIKACE & ŠKOLENÍ

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

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



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

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

Více na www.techseal.cz/skoleni nebo www.SkoleniMonteru.cz

Provozní bezpečnost a těsnost tlakových zařízení je zásadní prioritou v oblasti bezpečnosti práce, ochrany zdraví, životního prostředí a kvality výroby tzv. HSEQ.

Odborný garant:

Doc. Ing. J. Lukavský, CSc. a

*Ústav procesní a zpracovatelské
techniky, fakulta strojní*

ČVUT Praha

Technická 4

166 07 PRAHA 6

tel.: +420 604 443 284

Kontaktní osoby:

Ing. J. Tomáš

Technický úsek

TECHSEAL s.r.o.

Černokostecká 128/161

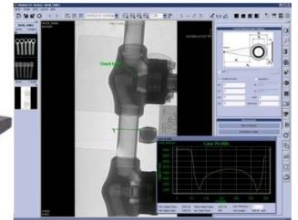
102 00 PRAHA 10

technici@techseal.cz

tel.: +420 602 337 058

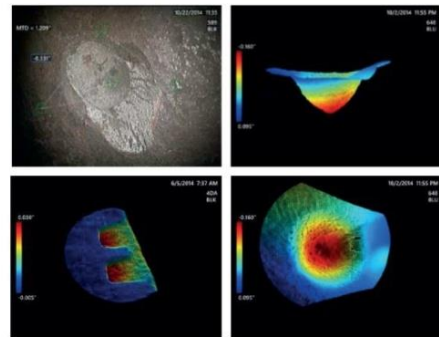
Digitální Rentgenová technika

Online snímání
DDA panely
Systémy digitální
radiografie CR
Rentgenky a
generátory



Endoskopy s 3D zobrazením a měřením

MENTOR Visual IQ
Ca-Zoom® Pan Tilt Zoom kamery



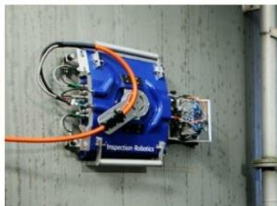
Ultrazvuk

MENTOR UT – mapování koroze
PALM a FLAT Scannery
DMS Go+, USM Go+
Phased Array sondy
Online snímáče



Inspekční roboti

Mapování koroze
Kontrola svarů
Visuální kontrola
nedostupných
míst



Váš partner v oblasti akreditovaného zkušebnictví, výzkumu a vývoje

Držitel certifikátu ISO 9001, nezávislé akreditované laboratoře splňují ČSN EN ISO/IEC 17025
Prověřený dodavatel z hlediska požadavků ČEZ, a.s.

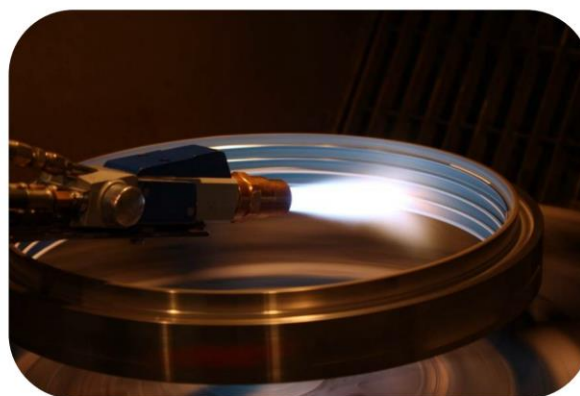
Nabízené služby - Energetika:

- měření, analýza a snižování vibrací a hluchnosti, vyvažování rotačních strojů (turbíny, generátory, čerpadla, převodovky, ventilátory atd.)
- kontrola dynamických vlastností základů strojních zařízení
- výpočet dynamického chování ložisek, rotorů a rotorových soustav
- materiálové zkoušky - chemické, metalografické, mechanické, creepové
- posuzování zbytkové životnosti energetických zařízení (kotle, turbíny atd.)
- měření provozních napětí a sil u energetických zařízení
- komplexní rozbory provozních poruch
- žárové nástřiky pro prvovýrobu i renovaci (ucpávky, vřetena, pánve, čepy atd.)
- výpočty pevnosti a únavové životnosti konstrukcí
- výpočty proudění v energetických strojích a zařízeních
- zkoušky seismické odolnosti a otřesuvzdornosti

Využití našich služeb Vám přinese zvýšení spolehlivosti a životnosti Vašich výrobků a zařízení a tím i značnou úsporu finančních prostředků.

Reference:

DOOSAN ŠKODA POWER, ČEZ, ÚJV Řež, Slovenské elektrárne, ŠKODA JS, Armatury Group, United Energy, Ansaldo Energia, Babcock Al-Khodari, General Electric, BRUSH SEM, ZAT, ŠKODA Praha, SIGMA PUMPY HRANICE, Wikov Gear, Severočeské doly, elektrárny a teplárny v ČR i zahraničí



- ▲ Nástřik labyrintového kroužku
- ◀ Telemetrický systém na lopatkách

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
tel.: +420 371 430 700
e-mail: vyzkum@vzuplzen.cz, www.vzuplzen.cz



TECHNICKOEKONOMICKÉ STUDIE DLOUHODOBÉHO PROVOZU (LTO) JE DUKOVANY A TEMELÍN – TECHNICKÁ ČÁST

TECHNICAL ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF DUKOVANY NPP LONG TERM OPERATION – TECHNICAL PART

Jan Wandrol

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

První technickoekonomická studie (TES) pro provoz JE Dukovany v LTO se provedla v letech 2006-2008 a hodnotila varianty provozu 40, 50 a 60 let. Jedním z výstupů této studie bylo doporučení zpracovat aktualizaci studie v roce 2016 jako podklad pro rozhodnutí o provozu Dukovan za rok 2025-27. V letech 2014-2016 byla na základě návodu MAAE TECDOC 1309 zpracována aktualizace TES ve spolupráci ÚJV Řež (metodika, technická část) a ČEZ (ekonomická část, riziková analýza, výstupy a doporučení).

First technical economic feasibility study of Dukovany NPP LTO was created in 2006-2008 and its objective was to assess options of long term operation 40, 50 and 60 years. One of the results of this study was suggestion to update the study until 2016 to prepare necessary information for decision on operation of Dukovany NPP beyond 2025-2027. From 2014 to 2016 updated TE study based on IAEA TECDOC 1309 was prepared in cooperation of ÚJV Řež (methodology, technical part) and ČEZ (economic part, risk analysis, results and suggestions).

1. Úvod

Dlouhodobý provoz jaderné elektrárny (JE) je cílem všech provozovatelů těchto zařízení, protože zkušenosti z celého světa ukazují, že přes zvýšené náklady spojené se zajištěním dlouhodobého provozu, je to finančně výhodnější, než stavět nové zdroje elektrické energie. Dlouhodobý provoz představuje provozování části zařízení JE za jejich projektovou životnost a výměnu nebo obnovu další části zařízení během jejich dlouhodobého provozu, se kterým původní projekt nepočítal.

Před tím, než vlastník rozhodne o zajištění dlouhodobého provozu a jeho strategii, je vhodné provést technickoekonomickou studii hodnotící technickou proveditelnost a ekonomickou výhodnost možných variant zajištění dlouhodobého provozu JE.

Problémy, které zajištění dlouhodobého provozu řeší, jsou způsobeny zejména stárnutím provozovaného zařízení, které omezuje dobu použitelnosti zařízení - životnost zařízení. Rozeznáváme dva druhy stárnutí, které jsou na sobě nezávislé:

- Morální stárnutí, způsobené tím, že zařízení vyprojektované před určitou dobou neodpovídá požadavkům vyplývajícím ze současného stavu poznání, což může vyvolat buď:
 - potřebu výměny, nebo modernizace zařízení tak, aby byla zajištěna v současnosti požadovaná bezpečnost, a spolehlivost JE,
 - anebo nedostatek náhradních dílů a technologií údržby u zařízení, která byla již nahrazena výrobou moderních typů.
- Materiálové a funkční stárnutí, které v závislosti na době provozu anebo četnosti používání mění fyzikální charakteristiky zařízení jaderné elektrárny a pokud není tento vliv zmírňován, zmenšuje bezpečnostní rezervy (faktory) obsažené v projektu zařízení JE, zvyšuje riziko poruch a snižuje úroveň jejich bezpečnosti.

Technickoekonomická studie dlouhodobého provozu JE z velké části představuje analýzu dopadů stárnutí na zařízení JE, návržení možných variant zmírňování těchto dopadů a jejich ekonomické vyhodnocení.

Oblast stárnutí zařízení, ale není jedinou oblastí hodnocení pro T-E studii, náklady dlouhodobého provozu mohou být způsobeny i dalšími faktory, např. nutností přípravy specifické dokumentace pro dozorný orgán, nutností řešit zvýšení kapacity technologií pro nakládání s odpady a s použitým jaderným palivem, důležitá je také otázka personálního zajištění dlouhodobého provozu, atd. Technickoekonomické hodnocení se skládá z hodnocení 11 nákladových kategorií, které by měly pokrývat všechny oblasti potenciálně zvyšující náklady dlouhodobého provozu JE.

Cílem technickoekonomické studie je stanovit celkovou dobu možného provozu JE a jeho finanční nákladnost.

2. Metodika přípravy technické části technickoekonomické studie LTO jaderných elektráren ČEZ

Technická část studie je provedena podle metodiky ÚJV Řež, a. s. [1], která vychází z dokumentu IAEA Cost drivers for the assessment of nuclear power plant life extension [2].

Cílem hodnocení v technické části studie je identifikace nákladově významných opatření nezbytných pro dlouhodobý provoz EDU. Hodnocení je prováděno na základě existujících podkladů (Plán obnovy provozovaných zdrojů, Health reporty, výsledky programů řízeného stárnutí, výsledky periodického hodnocení bezpečnosti - PSR, atd.), expertních názorů a zobecněné zkušenosti.

Hodnocení v technické části je prováděno pro nákladové kategorie:

1. Hodnocení zařízení ve struktuře logických celků
2. Ocenění dopadu na životní prostředí – EIA
3. Udržování schopnosti provádět expertní činnosti
4. Náhradní díly a spotřební hmoty
5. Zdokonalení programů a procesů řízení
6. Posouzení pro provoz a údržbu
7. Přijetí veřejností
8. Správa radioaktivního odpadu
9. Vyřazování JE z provozu
10. Zdokonalení palivového cyklu
11. Získání souhlasu SÚJB s provozem za projektovou životnost

První nákladová kategorie obsahuje zhodnocení všech zařízení elektrárny se zaměřením na zařízení nákladově významná. Ostatních 10 nákladových kategorií (NK) pokrývá zbývající oblasti a okolnosti spojené s provozováním elektrárny (hmotné i nehmotné), které mohou během dlouhodobého provozu přinést zvýšené náklady. Všechna hodnocení jsou uložena v databázi LTOs včetně vazeb na informační zdroje jako jsou Health reporty, výsledky programů řízeného stárnutí a výsledky periodického hodnocení životnosti, případně další podklady vytvořené přímo v souvislosti s hodnocením.

Výsledkem hodnocení je soubor všech nezbytných opatření (resp. akcí) pro jednotlivé posuzované varianty LTO, včetně určení jejich nákladů a termínů realizace. Náklady jsou určovány ekonomicky konzervativně, tzn., pokud lze daný problém řešit variantně, je pro ekonomický výpočet volena nejnákladnější varianta. Tento přístup však zároveň vytváří z hlediska nákladů určité potenciály, protože v praxi nedochází k realizaci vždy pouze

nejnákladnějších opatření. Tyto potenciály jsou v technickoekonomické studii také identifikovány a popsány.

Termíny realizace identifikovaných opatření byly stanoveny také s ohledem na cyklování odstávek, termíny akcí s předpokladem realizace v dlouhých odstávkách byly stanoveny do těchto odstávek.

Akce jsou evidovány v databázi LTOs ve struktuře uzpůsobené pro účely ekonomického výpočtu výhodnosti LTO. Každá akce je v databázi popsána, je uvedeno zdůvodnění nutnosti realizace (příčina a příslušný dokument) a další informace - cena akce, termíny realizace, rozdělení do etap (pokud je potřeba), vazba na odstávku, atd.

Jednotlivě jsou identifikovány akce s náklady nad 50 mil. Kč. Náklady na akce s jednotlivými náklady pod 50 mil. Kč jsou do ekonomického výpočtu doplněny sumární částkou. Tyto sumární částky v posledních cca 5 letech před koncem provozu v obou variantách LTO postupně klesají v souladu s trendem celkového poklesu investic ke konci provozu bloků.

3. Hlavní výsledky technické části technickoekonomické studie LTO JE Dukovany

Z výsledků technické části hodnocení nevyplývají žádné opatření, která by vylučovala dlouhodobý provoz jaderné elektrárny Dukovany až po dobu + 30 let za projektem uvažovanou životnost.

Hlavními předpokládanými opatřeními jsou:

Pro primární okruh

- Žihání tlakové nádoby reaktoru 1. bloku okolo roku 2035.
- Pořízení nových pohonů havarijních regulačních kazet (HRK) v letech 2017-2020.
- Výměna elektromotorů hlavních cirkulačních čerpadel kolem roku 2025.
- Opravy heterogenních svarových spojů primárních kolektorů parogenerátorů (opravy několika svarů již byly provedeny, další budou provedeny podle vývoje stavu jednotlivých svarů).

Pro sekundární okruh

- Výměna separátorů přehřívачů páry (postupně podle aktuálního stavu).
- Výměna nízkotlakých ohříváků okolo roku 2035.
- Výměna armatur s pneumatickým pohonem kolem roku 2035.

Pro vnější objekty

- Výměna elektrických generátorů dieselgenerátorů (2030).
- Postupná výměna potrubí technické vody důležité.
- Výměna nepřístupných potrubí surové vody z čerpací stanice do areálu JE (2025).

Pro stavební objekty

- Kompletní rekonstrukce střešních plášťů a konstrukcí (po roce 2020).
- Oprava podzemních potrubních a kabelových kanálů (okolo roku 2030).
- Rekonstrukce jeřábů 250 tun na reaktorovém sále I, II (okolo roku 2030).
- Postupná obnova železobetonových konstrukcí chladicích věží.

Pro elektro a systémy kontroly a řízení

- Výměna kabeláže s vyčerpanou životností.
- Převinutí generátorů kolem roku 2030.

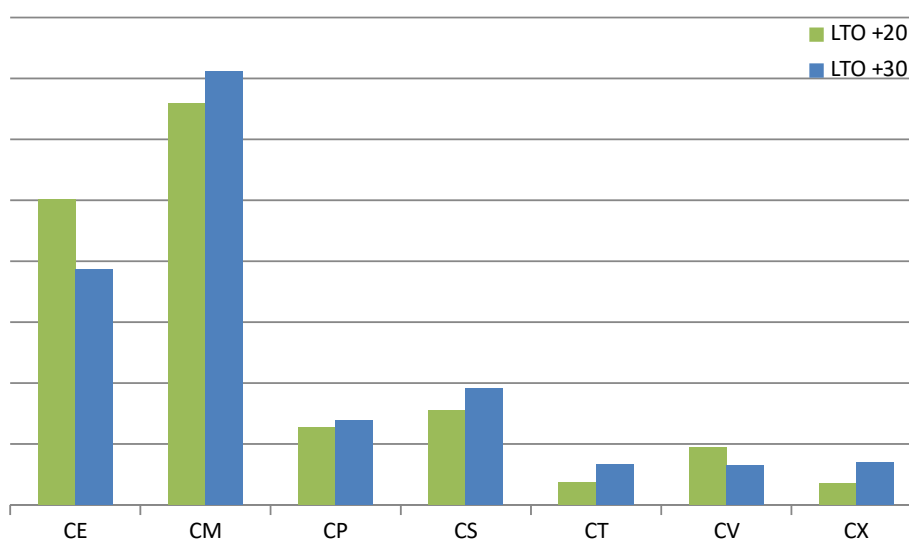
- Rekonstrukce elektrické části dieselgenerátorové stanice (po roce 2020).
- Postupná výměna původních hermetických kabelových průchodek (od roku 2020).
- Rekonstrukce úsekových a podružných rozvaděčů (po roce 2020).
- Výměna, nebo oprava generátorových vypínačů (kolem roku 2030).
- Rekonstrukce elektrických ochran bloku (kolem roku 2030).
- Obecně pro většinu systémů SKŘ bude zejména pro variantu provozu LTO +30 let potřeba provést opětovnou komplexní, nebo alespoň částečnou obnovu.

Z hodnocení ostatních nákladových kategorií vyplývají tyto hlavní opatření a rizika:

- Splnění podmínek SÚJB k prvnímu prodloužení provozu.
- Změny existujících a zavedení nových programů zejména spojených s řízením stárnutí a spolehlivosti.
- Zajištění dostatečného počtu kvalifikovaného personálu (v návaznosti na generační obměnu a aktuální a předpokládaný stav na trhu práce).
- Podpora pozitivního vnímání jaderné energetiky veřejností.
- Postupné zvyšování nákladů na údržbu vlivem stárnutí zařízení a údržby nově instalovaných systémů a zařízení (např. nové systémy a zařízení instalované v důsledku Stress testů).

Tabulky a obrázky

JMA CAPEX a OPEX dle LC v mil. Kč



Obr. 1 Srovnání nákladů na obnovu jednotlivých logických celků a pro dvě zvažované varianty dalšího prodloužení provozu (+20 a +30 let) (akce nad 50 mil. Kč, cenová úroveň 2016)

Literatura

- [1] Wandrol, J., Bátěk, D. (2013): *DITI 2301/257 R1, Metodika aktualizace technicko-ekonomického hodnocení zajištění dlouhodobého provozu českých jaderných elektráren. Postup zajištění technické části*. Místo vydání: ÚJV Řež, a. s.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Cost drivers for the assessment of nuclear power plant life extension, IAEA-TECDOC-1309*, Vienna, 2002

TECHNICKO-EKONOMICKÉ STUDIE LTO JE DUKOVANY (EDU) - EKONOMICKÁ ČÁST, RIZIKOVÁ ANALÝZA, VÝSTUPY A ZÁVĚRY

TECHNICAL ECONOMIC STUDY OF LTO DUKOVANY NPP - THE ECONOMIC PART, RISK ANALYSIS, OUTPUTS AND CONCLUSIONS

Dušan Pluhař

ČEZ, a.s.

Abstrakt

T-E studie (TES) je základním zdrojem informací pro strategické rozhodnutí o provozu EDU po roce 2027. Výsledkem ekonomické části TES jsou výpočty na základě výstupů z hodnocení zařízení a dalších oblastí v technické části TES – čistá současná hodnota (NPV) variant LTO (LTO20, LTO30) jako hlavní parametr k výběru optimální varianty, citlivostní analýzy hlavních parametrů a hlavní rizika spojené s LTO. Výstupem TES je stanovení optimální varianty LTO a definování základních předpokladů a podmínek pro její zajištění.

T-E study is a basic source of information for strategic decisions on operation of the Dukovany NPP after the year 2027. The result of the study are economic calculations on the basis of the outputs from the evaluation device and other areas in the technical part of the study – Net Present Value (NPV) of the variants of the LTO (LTO20, LTO30) as the main parameter to selection of the optimal variant, sensitivity analysis of the main parameters and the main risks associated with the LTO. The output of the study is to determine the optimal variant of LTO and defining the basic assumptions and conditions for its collateral.

Ekonomická část T-E studie

Cílem **ekonomické části** bylo stanovit NPV posuzovaných variant LTO (LTO20, LTO30) včetně fáze vyřazování (do roku 2085) jako hlavní parametr k jejich srovnání a výběru optimální varianty. Výpočetní model počítá v jednotlivých letech cash-flow (CF), které diskontuje WACC. Suma diskontovaných CF (DCF) pak představuje NPV.

Cenové scénáře – citlivostní analýza na vývoj ceny elektrické energie

V rámci výpočtu NPV byly použity 4 scénáře vývoje cen elektrické energie, které jsou používány při hodnocení příležitostí Skupiny ČEZ. Jde o **stress test scénář SVET8** (nejvíce nepříznivý cenový vývoj - uvažuje nejnižší ceny paliv v EU, naplnění cílů EU pro úspory a rozvoj OZE a kolaps trhu s povolenkami), **inflační scénář** (forwardová cena extrapolovaná inflací), **centrální scénář** (ceny paliv založené na predikci analytiků a dopadů změn na trhu s elektřinou - změny poptávky, nárůst OZE, odstavení klasických a jaderných elektráren - vychází z předpokladů a výpočtů ČEZ) a **analytický scénář** (průměr názorů analytiků na vývoj ceny elektřiny a dalších komodit, které vývoj ceny silové elektřiny ovlivňují). Referenční scénář pro srovnání variant LTO je centrální scénář, v jehož rámci byly na základě výstupů citlivostních analýz hlavních parametrů hodnoceny i downside a upside scénáře s největším dopadem na výstupy hodnocení jako test odolnosti variant.

Další hodnocené scénáře

Kromě těchto základních scénářů jsou hodnoceny navíc další scénáře, kde jsou uvažovány možné odchylky termínových, nákladových a investičních vstupů do výpočtů za účelem ocenění jejich dopadů do celkové ekonomiky dlouhodobého provozu zdroje. Nejedná se tak o scénáře vývoje ceny elektřiny, ale scénáře, které jsou počítány na centrálním scénáři vývoje cen silové elektrické energie. Jedná se o následující scénáře:

- Konzervativní (downside) scénář, jež zahrnuje zhoršení parametrů, na něž má NPV nejvyšší citlivost, nebo známé významné riziko, že takový scénář lze očekávat.

- Scénář hodnotící dopad nepředpokládaného předčasného ukončení provozu bloků v letech 2030-32 z důvodu naplnění některého z rizik, které může takový stav vyvolat.
- Nulový scénář, tzn. odstavení bloků v roce 2017, který slouží k demonstraci dopadu „mezního“ případu na NPV a jeho srovnání s výsledky hodnocených variant provozu.
- „Upside scénář“, který zahrnuje možnosti zlepšení výsledku NPV díky realizaci méně nákladných variant opatření z technické části studie, odstranění části konzervatismů základního scénáře a potenciál daňového štítu v rámci Skupiny ČEZ.

Hlavní vstupy a parametry modelu pro výpočet NPV a citlivostní analýzy

Nejnáročnějším a nejrozsáhlejším vstupem je soubor nákladových opatření (investičních akcí s termíny realizace a náklady - CAPEX), jež je výstupem z hodnocení zařízení a dalších nákladových kategorií provedeného v technické části TES. Na obr. 1 je znázorněno rozložení celkových nákladů na opatření pro všechny varianty LTO (LTO10, LTO20, LTO30).

Další vstupní data modelu pro výpočet NPV, které byly vytvořeny a shromážděny:

- Dlouhodobě dosažitelný elektrický výkon bloků, účinnost bloků a vlastní spotřeba
- Disponibilita (délka odstávek a poruchovost na základě realizace opatření)
- Variabilní náklady:
 - jaderné palivo
 - nepalivové (chladicí voda, energie)
 - odvod na jaderný účet – JÚ - (trvalé úložiště vyhořelého jaderného paliva)
- Stálé náklady:
 - osobní náklady
 - režijní náklady a pojištění
 - náklady na údržbu
 - daň z nemovitostí
 - náklady na vyřazení z provozu (tvorba rezervy)
- Odpisy (historických a budoucích investic, obalových souborů a paliva)
- Inflační a eskalační koeficienty (pro různé typy investic)
- Forex a WACC (vážené průměrné náklady kapitálu)

Výstupy citlivostních analýz a výpočtu NPV

Z těchto základních parametrů model počítá další vstupy jako tržby, hrubou marži, daň z příjmu a celkové odpisy. Z nich pak v jednotlivých letech cash-flow (CF), které diskontuje WACC. Suma diskontovaných CF (DCF) pak představuje hodnotu NPV. Na obr. 2 jsou srovnané výstupy výpočtu NPV pro jednotlivé cenové scénáře a variantu LTO20 (2035-37).

Pro správnou volbu odchylek pro up/down side scénáře byly provedeny citlivostní analýzy (změna NPV v závislosti na změně parametru) na následujících parametrech: cena jaderného paliva, náklady na údržbu, personální náklady, investiční náklady, disponibilita, odvod na JÚ, cena surové vody a roční tvorba rezervy na vyřazování.

Z citlivostních analýz podle plyne, že při uvažování stejného scénáře vývoje tržních cen silové elektřiny vychází jako zásadní parametr dopadu na NPV disponibilita bloků, dále pak změna CAPEX. S použitím těchto parametrů a možného rizika změny tvorby roční rezervy na vyřazování a její velikosti byly vytvořeny up/down side scénáře (změna dostupnosti o $\pm 1\%$, změna CAPEX o $\pm 10\%$, u LTO30 o $+20\%$, využití daňového štítu, nárůst plateb na vyřazování o 25% a dopad možného zkrácení tvorby rezervy na 30 let od odstavení bloků).

Nejvyšší hodnotu NPV v inflačním cenovém scénáři má varianta výkonového provozu LTO20 (50 let, do roku 2035-37), v centrálním a analytickém scénáři pak varianta LTO30 (60 let, do roku 2045-47). Varianta LTO20 vykazuje ve všech cenových scénářích kromě stress test výrazně vyšší NPV než LTO10, LTO30 má nižší NPV i v inflačním scénáři. Hodnocení varianty LTO30 je zatíženo největšími neurčitostmi vývoje trhu a vývoje stavu zařízení bloků s aktuálně velmi neurčitě specifikovaným dopadem do výroby.

Jako nejvýhodnější se tedy v současnosti z hlediska NPV jeví při současně platné predikci tržních cen elektrické energie a nejistot ohledně stavu zařízení (především kabeláž) varianta provozu 50 let, tj. do let 2035-2037 (LTO20). Tato varianta je dostatečně odolná i v případě hodnocených downside scénářů včetně náhlého odstavení v letech 2030-32. Záporné NPV při stress testovém cenovém scénáři SVET8, představující komoditní riziko, je menší než ztráta při okamžitém odstavení EDU.

Riziková analýza – metodika, výstupy

Riziková analýza [1] (RA) identifikuje a hodnotí rizika ohrožující varianty LTO EDU. Je zpracována podle mezinárodních standardů na řízení rizik a normu ČSN ISO 31000. Vychází z poslední aktualizace (2013) RA LTO EDU 2008 a Mapy rizik a příležitostí lokality Dukovany (2014).

Registr rizik obsahuje 111 rizik, z toho 74 otevřených. U každého rizika je uvedena příčina vzniku rizikové události, popis rizika, pravděpodobnost a jeho dopad. Dále je vyjádřena inherentní (tj. bez aplikace opatření) úroveň a reziduální úroveň (tj. úroveň snížení rizika aplikací opatření) pro obě varianty LTO. K rizikům je navržen postoj (akceptování, eskalování, vyjasnění, zmírnění) a jsou popsána možná opatření a identifikován jejich řešitel.

Dopadem některých rizik (kritických - jejich inherentní skóre je vysoké pro obě varianty LTO) může být záporná, popř. pouze slabě pozitivní ekonomická efektivita LTO. Dopadem jiných rizik může být dokonce neplánované, šokové ukončení provozu před cíleným (tj. plánovaným) termínem. Značná část rizik, i kritických, v čase roste, počet rizik s vysokým skóre na inherentní úrovni (před opatřením) a především reziduální úrovni (po aplikaci opatření) je pro LTO30 výrazně vyšší než pro LTO20.

Pro LTO20 je identifikováno 15 rizik s vysokým skóre na inherentní úrovni a zbývá pouze 5 po aplikaci opatření, pro LTO30 existuje 26 rizik s vysokým skóre a na reziduální úrovni zbývá 11 rizik s vysokým skóre: pokles ceny elektrické energie a struktura trhu; regulace - notifikace Evropskou komisí, nakládání s radioaktivními odpady, vyřazování a likvidace JE; politická rozhodnutí; zvyšující se požadavky na bezpečnost; veřejné mínění, tlak nevládních organizací, mezinárodních institucí a vlád; životnost klíčového zařízení; dostupnost kvalifikovaného personálu; retence know-how). Varianta LTO30 je tedy zatížena riziky více.

Hlavní celkové závěry

Z uvedených výstupů plyne, že v současnosti **optimální variantou** z hlediska NPV, odolnosti proti downside scénářům, nejistot a rizik **je provoz do roku 2035-37 s možností, v případě pozitivního vývoje hlavních determinantů** (ceny EE, investice a jejich dopad do disponibility, nejistoty a rizika), **i delšího provozu.**

Pro zajištění bezpečného a úspěšného dlouhodobého provozu v horizontu uvedeného období **je kromě zajištění požadovaného stavu technologie a projektu a mitigace nejvýznamnějších rizik nutné splnit další základní předpoklady a nezbytné, avšak nikoliv postačující podmínky.** Mezi klíčové patří především:

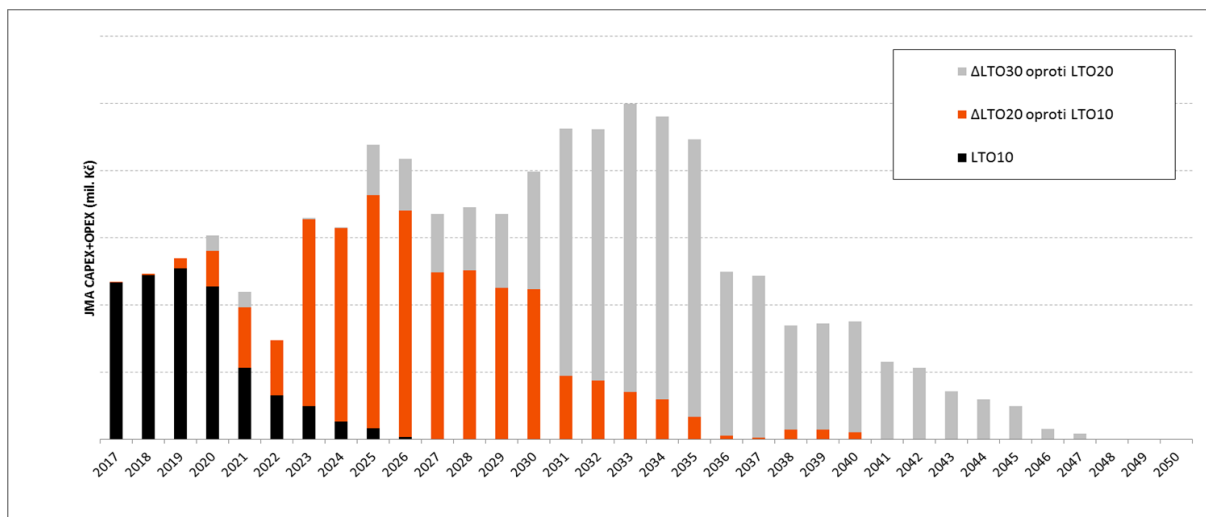
- zajištění dostatečného počtu dostatečně kvalifikovaného a motivovaného personálu
- zajištění nejvyšší úrovně profesionality personálu a kvality všech řídicích procesů
- zajištění funkčního a komplexního knowledge managementu v jaderných procesech

- udržování vysoké míry přijatelnosti jaderné energetiky a provozu EDU veřejností
- dlouhodobé zachování a zvyšování schopnosti a stability klíčových dodavatelů

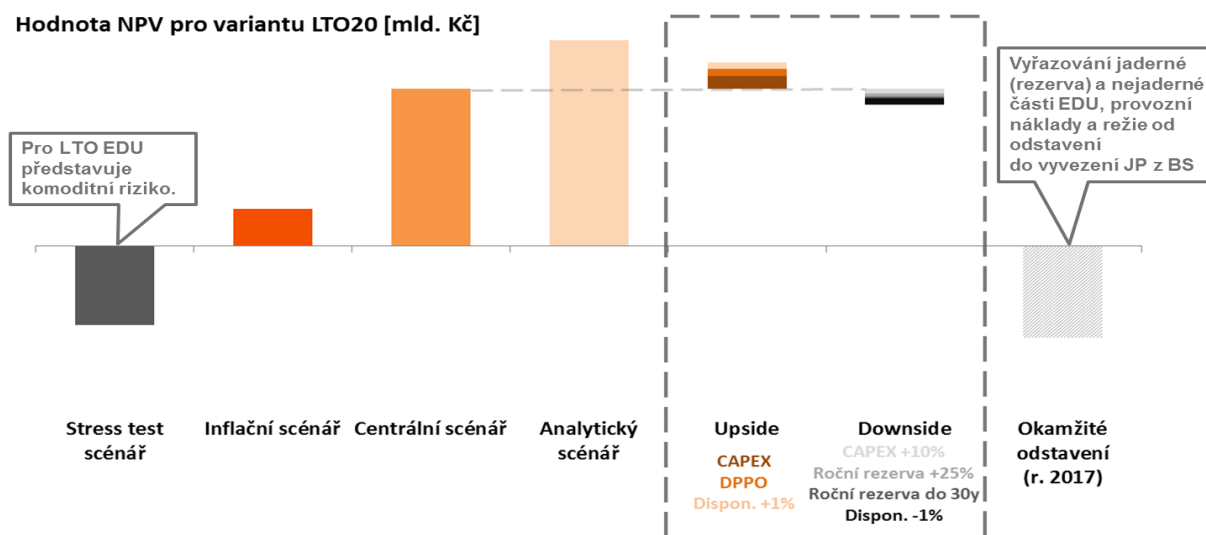
Naplnění těchto podmínek v požadované kvalitě zároveň přispívá nebo přímo vede k mitigaci některých kritických rizik.

Poznatky získané při tvorbě této T-E studie budou pravidelně aktualizovány a v budoucnu mohou sloužit jako základ pro zkoumání možnosti prodloužení i za hranicí 60 let provozu.

Tabulky a obrázky



Obr. 1 Celkové náklady nad rámec běžné údržby (CAPEX+OPEX) v cenové úrovni 2016



Obr. 2 NPV pro jednotlivé cenové scénáře a variantu LTO20

Literatura

[1] Bočková, J., Pluhař, D. (2016): *Riziková analýza LTO Dukovany +20, +30 let*, ČEZ, a.s.

PROGRAM ŘÍZENÉHO STÁRNUTÍ PRO RIZIKOVÁ MÍSTA SE SVAROVÝMI SPOJI (PŘS RMSS) JADERNÝCH ELEKTRÁREN

AGEING MANAGEMENT PROGRAM FOR RISK WELDS (AMP RMSS) OF NUCLEAR POWER PLANTS

Jakub Ertl

Technika JE, ČEZ a.s.

Abstrakt

Program řízeného stárnutí (PŘS) je definován jako program k identifikování všech mechanismů stárnutí, které jsou relevantní pro systémy, konstrukce a komponenty (SKK) důležité z hlediska bezpečnosti, ke stanovení jejich možných dopadů a ke stanovení nezbytných opatření pro zachování provozuschopnosti a spolehlivosti těchto SKK. PŘS RMSS je zaměřen na rizikové svarové spoje provozované na českých jaderných elektrárnách a integruje v sobě metody deterministického a stochastického hodnocení stárnutí. V příspěvku je popsán princip PŘS RMSS a metodika hodnocení rizikovitosti svarových spojů.

The ageing management program (AMP) is defined as a program to identify all ageing mechanisms that are important to safety-critical systems, constructions and components (SKKs), to determine their possible impacts, and to establish the necessary corrective measures to gain functionality and reliability of these SKKs. AMP RMSS is focused on risk welds of Czech nuclear power plants. This AMP integrates methods of deterministic and stochastic evaluation of ageing. This paper describes the risk assessment of welds.

Úvod

PŘS RMSS stejně jako každý další program řízeného stárnutí splňuje požadavky IAEA vyjádřeny v podobě devíti povinných atributů [1]. PŘS RMSS je zaměřen na rizikové svarové spoje a integruje v sobě metody deterministického a stochastického hodnocení stárnutí. Ideové myšlenky této integrace lze nalézt v mezinárodní [2] i národní [3] legislativě. PŘS RMSS je realizován na obou jaderných elektrárnách provozovaných ČEZ, a.s.

Vstup do PŘS RMSS

Výběr svarových spojů, které se v PŘS RMSS hodnotí, je každoročně prováděn odstupňovaným způsobem dle selektivního algoritmu, který zohledňuje typ svarového spoje (heterogenní, homogenní svar), zatížení svaru degračnými mechanismy, umístění svarového spoje v technologii, zkušenosti ze světa a další.

Princip PŘS RMSS

V rámci PŘS RMSS je stanovena aktuální úroveň rizika a stav hodnocených svarových spojů. Svarový spoj je kategorizován dle typu materiálového a konstrukčního provedení, následuje hodnocení pěti etap souvisejících s provozem svarového spoje:

- a) Etapa projektování a výroby – hodnocení dokumentace svařování, průkazné dokumentace, výrobních a montážních kontrol a další.
- b) Etapa provozování – hodnocení degračních mechanismů, stavů urychlujících degradaci, zkušeností ze světa a další.
- c) Etapa provozních kontrol – hodnocení nastavení provozních kontrol a jejich výsledků, zkušeností ze světa a další.
- d) Následky poškození s ohledem na jadernou bezpečnost – hodnocení dopadů porušení integrity svarového spoje do jaderné bezpečnosti.

- e) Následky poškození s ohledem na ekonomiku provozu - hodnocení dopadů porušení integrity svarového spoje do ekonomiky provozu.

Pro zajištění činností v rámci PŘS RMSS je definován expertní tým, složený ze zástupců útvarů dané jaderné elektrárny, centrálních útvarů a zástupce externího dodavatele. Hodnocení RMSS dané organizační jednotky probíhá standardně třífázově jednou za rok:

- **První fáze** - stanovení rizikových skóre pro každý svar (cca 30 rizikových skóre pro jeden svar). Tato fáze probíhá na jaderné elektrárně v rámci jednání expertního týmu RMSS.
- **Druhá fáze** - vložení rizikových skóre do matematického modelu, stanovení indexů jednoduchých rizik a návrh nápravných opatření. Tato fáze probíhá na pracovišti externího dodavatele.
- **Třetí fáze** – projednávání a finalizace nápravných opatření pro každý jednotlivý svarový spoj a to včetně přiřazení zodpovědných útvarů a termínů plnění. Tato fáze probíhá na jaderné elektrárně v rámci jednání expertního týmu RMSS.

První fáze hodnocení RMSS

První fáze hodnocení RMSS spočívá v přiřazení rizikového skóre (bodového hodnocení) daným hodnotícím otázkám podle stanovených pravidel. Hodnocení otázek pomocí rizikového skóre je provedeno dle následujících pravidel:

- Každé z otázek je přiřazeno celé číslo (rizikové skóre) v rozmezí od 0 do 5 (dle typu otázky), přičemž skóre 0 reprezentuje nejmenší riziko a číslo 5 naopak největší riziko.
- Pokud je hodnocená otázka pro dané RMSS irelevantní (není na místě) - označeno „-1“. Otázka nevstupuje do hodnocení.
- Pokud nějaká skutečnost není známa nebo v danou chvíli dosud není prověřena nebo nejsou k hodnocenímu faktoru informace, je otázka nehodnocena – „prázdné pole“. K hodnocení dané otázky nejsou v danou chvíli k dispozici informace a pole nevstupuje do hodnocení. Platnost výsledných indexů rizika je verifikována na základě ostatních hodnotících otázek a stanovených skóre.

Pro ilustraci je v Tabulce č. 1 uvedeno znění hodnotící otázky pro stanovení skóre k hodnocení degradačního mechanismu nízkocyklová únava. Princip vlastního hodnocení RMSS včetně následného vypočítání výsledných indexů rizik a jejich prezentace v maticích rizika je zachycena na Obrázku č. 1.

Druhá fáze hodnocení RMSS

Druhá fáze hodnocení RMSS spočívá ve stanovení indexů rizik – index potenciálu poškození, index bezpečnostních následků, index ekonomických následků a index stavu. Na základě jednotlivých indexů jsou potom prostřednictvím matic (jednorozměrných a dvourozměrných) stanovena rizika (barvy – zelená, bílá, žlutá a červená). Matice pro riziko bezpečnostních následků je zachycena v Tabulce č. 2, Pravidla pro stanovení intenzity výsledného plánování pro každý svarový spoj na základě kombinace barev jednotlivých rizik jsou uvedena v Tabulce č. 3.

Krátkodobé a střednědobé plánování indikuje realizaci nápravných opatření v nejbližší odstavce nebo v nejbližší plánované odstavce daného výrobního bloku v souladu se závěry expertního týmu. Dlouhodobé plánování indikuje realizaci nápravných opatření v plánované periodě kontrol v souladu se závěry expertního týmu.

Třetí fáze hodnocení RMSS

Třetí fáze hodnocení RMSS spočívá v projednání a verifikaci stanovených rizik (barev) a to včetně stanovení nápravných opatření. Dle úrovně výsledného rizika jsou následně definována nutná opatření pro snížení.

Závěr

Výstupem PŘS RMSS je hodnocení jednotlivých svarových spojů (indexy, barvy jednotlivých rizik včetně stanovení nápravných opatření). Výstupní hodnocení je zpracováno formou přehledové tabulky a je opatřeno podepsaným krycím listem s archivním číslem dokumentu.

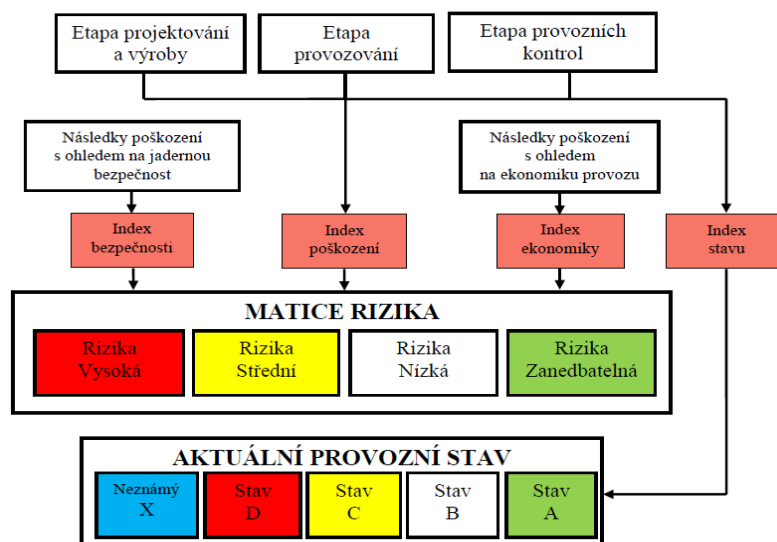
Literatura

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2009), *Ageing Management for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-2.12.*
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2011), *A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process, INSAG-25, IAEA, Vienna.*
- [3] NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE A. S. I., (2016), *Sekce Zvláštní případy zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, PŘÍPAD 08/2016 - Obecná metodika komplexního hodnocení životnosti jaderných zařízení.*

Tabulky a obrázky

Tabulka č. 1 – Pravidla pro hodnocení degračního mechanismu nízkocyklová únava (hodnotí se prostřednictvím softwaru Dialife, který udává aktuální kumulaci únavového poškození D).

Hodnocení rizika	Rizikové skóre
Oblast svaru z pohledu DM NCÚ nezasluhuje pozornost Vliv DM NCÚ posouzen, ale pravidelné hodnocení v DIALIFE se neprovádí z důvodu zanedbatelného poškození	1
DIALIFE s aktuálním hodnocením poškození $D \leq 0.4$	2
DIALIFE s aktuálním hodnocením poškození $0.4 < D \leq 0.8$	3
DIALIFE s aktuálním hodnocením poškození $0.8 < D \leq 1$	4
DIALIFE s aktuálním $D > 1$ nebo vliv DM NCÚ nebyl posouzen	5



Obrázek č. 1 – Princip hodnocení PŘS RMSS

Tabulka č. 2 – Matice pro riziko bezpečnostních následků (RBN) – barva určena podle dvourozměrné matice.

		RIZIKA BEZPEČNOSTNÍCH NÁSLEDKŮ			
Index potenciálu poškození	< 0,25	Zanedbatelná	Zanedbatelná	Nízká	Nízká
	0,25 - 0,5	Zanedbatelná	Nízká	Střední	Střední
	0,5 - 0,75	Nízká	Střední	Střední	Vysoká
	0,75 - 1	Nízká	Střední	Vysoká	Vysoká
Index bezpečnostních následků		< 0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 0,75	0,75 - 1

Pozn. Pro rizika potenciálu poškozením (RPP), provozního stavu (RPS) a ekonomických následků (REN) existují analogické matice.

Tabulka č. 3 – Stanovení intenzity výsledného plánování pro jednotlivé svarové spoje

Pravidla		Výsledné plánování				
Pravidlo	Popis	RPP	RBN	REN	RPS	Intenzita plánování
1. Pravidlo vysokého rizika	Červená barva RPP nebo RBN nebo REN nebo PS ⇒ krátkodobé plánování	V	S	S	C	Krátkodobé plánování
		S	V	S	X	
		V	N	S	D	
2. Pro neznámý stav – pravidlo potenciálu poškození	Plánování je dáno barvou RPP o jednu vyšší	S	S	S	X	Krátkodobé plánování
		N	N	S	X	Střednědobé plánování
		Z	N	N	X	Dlouhodobé plánování
3. Pro známý stav – pravidlo „vyšší bere“	Plánování je dáno nejvyšší barvou z RBN, REN příp. PS	S	N	S	B	Střednědobé plánování
		S	S	N	A	Střednědobé plánování
		N	N	Z	C	Střednědobé plánování
		N	N	N	A	Dlouhodobé plánování
		N	Z	N	B	Dlouhodobé plánování
		Z	N	Z	A	Dlouhodobé plánování
		N	Z	Z	A	Bez plánování
Z	Z	Z	A	Bez plánování		

JADERNÉ OPRAVÁRENSTVÍ HLAVNÍCH KOMPONENT JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER V ČESKÝCH PODMÍNKÁCH S DŮRAZEM NA OPRAVY SVAŘOVÁNÍM

REPAIR OF WWER TYPE NUCLEAR POWER PLANT MAIN NUCLEAR COMPONENTS IN CZECH CONDITIONS WITH EMPHASIS ON WELD REPAIRS

Tomáš Soukup a Radek Konop

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Opravné svařování Systémů, konstrukcí a komponent (SKK) jaderných elektráren (JE) typu VVER má ve společnosti ŠKODA JS dlouholetou tradici. V posledních letech vyvíjela a realizovala technologicky náročné opravy hlavních komponent primárního okruhu. Při řešení oprav byly aplikovány poznatky mnoha oborů na světové úrovni. Získané zkušenosti a poznatky byly použity jako základ pro další vývoj oboru jaderného opravárenství a to včetně oprav tlakových nádob reaktorů (TNR), které jsou sice nepravděpodobné, ale připravenost na ně je jednou ze základních podmínek dlouhodobého provozu.

Repair welding of main SSC (Systems, Structures, and Components) in the company ŠKODA JS a.s. has a long time history. It has been developing and put in to practice technologically demanding repairs of main components of primary circuit in the last years. There was applied knowledge from many fields at the worldwide level. Obtained experience and knowledge were used as a basis for further development of the nuclear repair field included repairs of Reactor Pressure Vessels (RPVs), which are unlikely but be prepared for it is one of basic conditions of long term operation.

Úvod do jaderného opravárenství a legislativy

Jaderné opravárenství je nedílnou součástí životního cyklu JE, přímo navazuje na úvodní a prováděcí projekt každé JE, velmi úzce souvisí s platnou legislativou, technickými předpisy a aplikovanými technickými normami daného projektu. Přístup k opravám odpovídá zatřídění příslušných SKK dle platné legislativy a projektem aplikovaných technických norem a tzv. „jaderných kódů“. Pro dlouhodobý provoz JE jsou klíčovými komponenty primárního okruhu, kterými jsou tlaková nádoba reaktoru, parogenerátory, hlavní cirkulační potrubí, hlavní cirkulační čerpadla, kompenzátor objemu, hlavní uzavírací armatury aj. Tyto komponenty jsou zpravidla nevyměnitelné, příp. vyměnitelné za náročných technických a finančních podmínek. To dokazují časté výměny vík TNR v USA, Francii, Japonsku aj. spojené se značnou degradací svarových spojů nátrubků víka. Degradace materiálů hlavních komponent JE, jejich řízení a provádění oprav je klíčovým aspektem při zajištění bezpečného provozu. Obrovský ekonomický význam pak má předcházení degradaci materiálů.

Rozvoj československé jaderné energetiky byl založen na ruském projektu vodovodních energetických reaktorů typu VVER, pomíneme-li první čs. JE pod označením A1 chlazenou plynem. Rozvoj jaderné energetiky vycházel ze státního plánu a tomu odpovídalo obrovské úsilí věnované výzkumu, přípravě, projektování, výrobě, spuštění ale i provozu a opravám. V průběhu 70. a 80. let tak byla vybudována široká vědecko-výzkumná, technická a výrobní základna schopná dodávat celé bloky dle úvodního ruského projektu. Značná pozornost byla věnována tvorbě legislativy v oblasti výstavby a provozu JE. Tato propracovaná legislativa zaměřená zejména na výstavbu komplexních technologických celků a vycházející z tehdejších sovětských předpisů, platila ještě na počátku 90. let minulého století. Měla poměrně přesně nastavena rozhraní, kde mohla být aplikována tehdejší čs. technická normalizace.

Výše popsaná situace tedy představuje stručně charakteristiku prostředí, ve kterém vznikaly úvodní a prováděcí projekty, výroba a montáž současných JE v České i Slovenské Republice. Je vhodné vyzdvihnout, že hlavní komponenty se vyznačují vysokou technologicko-výrobní náročností, vyžadující velmi vysoké požadavky na zajištění jejich kvality a to jak v procesu jejich výroby, tak v procesu jejich provozu a zajištění oprav. Tyto procesy vyžadují velmi vysoké požadavky na kvalifikaci pracovníků účastných daných procesů, přístup k potřebným informacím, budování a udržování potřebné znalostní báze. Touto potřebnou znalostní bází není jen znalost aktuálního stavu projektu ve vazbě na legislativu a technickou normalizaci, ale zejména znalosti z oblasti degradace materiálů za provozu a jeho řízení, schopnost navrhování a řešení případných oprav degradovaných SKK v souladu s danými požadavky. Podobně klíčovým bodem je spolupráce provozovatele JE s výrobcí komponent, protože provozovatel nemá přístup k detailní konstrukční dokumentaci. Skutečnost, že na trhu působí stále ještě výrobci většiny hlavních komponent JE, značně ulehčuje schopnost zajištění potřebného know-how k provádění oprav těchto komponent.

JE Dukovany byla uvedena do provozu v původním legislativním prostředí, v případě JE Temelín probíhala výstavba později a spuštěna byla za změněných legislativních podmínek, které však neměly dopad na projektování, konstrukci a výrobu v rámci tzv. sovětské zóny. Takto popsané informace jsou klíčové pro pochopení současného dění ohledně stavu projektu JE Dukovany a JE Temelín a schopnosti provádět odborně údržbu a opravy těchto JE v souladu s platnou (současnou) legislativou. Soulad s platnou legislativou nutně neznamená soulad s projektem stanovenou a požadovanou technickou normalizací.

Historie opravného svařování

Po uvedení prvních čs. JE do provozu zadal stát společnosti ŠKODA JS (tehdy záводу výstavby jaderných elektráren ŠKODA ZVJE) jako výrobcí TNR úkol na vývoj jejich oprav. V té době již byly v rámci programu osvojení technologie výroby reaktorových kompletů VVER 440 a 1000 vypracovány technologie oprav vad vzniklé v průběhu výroby TNR, zejména ve svarech a návarech. Existují dva základní způsoby provádění oprav a to v závislosti na tom, zda byly vady zjištěny před provedením konečného tepelného zpracování celé TNR (opravy se prováděly za podmínek odpovídajících výrobní technologii – zpravidla ručně obalenou elektrodou s předehřevem) nebo již byly příslušné díly nebo komponenty tepelně zpracovány a situace tak byla složitější. Již v období vývoje oprav TNR v průběhu výroby bylo tedy zřejmé, že opravy vad zjištěné na TNR před uvedením do provozu nebo v jeho průběhu budou velmi pravděpodobně nerealizovatelné s následným tepelným zpracováním (TZ) po svaření a mnohdy bude problematický i předehřev před svařováním. To vedlo již v průběhu 80. let ke značnému výzkumu svařitelnosti a možnosti použití metod oprav TNR bez předehřevu a následného TZ. Byla vyvinuta a následně i aplikována metoda žíhací housenky s použitím projektem předepsaných svařovacích materiálů a to např. při opravě hrdlové sekce JE Jaslovské Bohunice.

Koncepce opravného svařování hlavních komponent I.O. JE typu VVER vycházela a stále vychází z ruského projektu, je tedy založena na ruských přídavných svařovacích materiálech. Znalost jejich materiálově metalurgických vlastností je pro opravy klíčová.

Přestože je role ruského projektu z hlediska oprav stále dominantní okrajovou podmínkou při jejich realizaci, díky vývoji nových technologií a materiálů, a v nedávné minulosti i nedostupnosti nebo kvalitě původních značek svařovacích materiálů, zavádí provozovatel bloků VVER a dodavatel oprav nové přístupy v opravárenství. Jedním z nich je např. atestace amerického přídavného materiálu Inconel 52(M) pro opravy vnitřního povrchu provozované TNR. Atestaci a kvalifikaci tohoto nového přídavného materiálu ve vazbě na materiály TNR VVER 440 a VVER 1000 byla věnována velká pozornost v průběhu posledních téměř 20 let.

Technologie oprav vyvinuté v poslední době

V posledním desetiletí bylo nutné vyvinout řadu oprav hlavních komponent JE Dukovany ale i JE Temelín. Ukázalo se, že s určitým časovým zpožděním oproti západním typům reaktorů se i české bloky začínají velmi často potýkat s vadami v heterogenních svarových spojích. Některé opravy byly aplikovány v praxi, některé byly vyvinuty pro případ jejich budoucí potřeby. Při vývoji těchto technologií bylo nezbytné aplikovat komplexní systémový přístup s využitím projektových, konstrukčních, materiálových a technologických znalostí multi-profesního zaměření. Jednalo se zejména o tyto opravy:

- Oprava per šachty reaktoru JE Temelín
- Oprava heterogenního svarového spoje č.76/77 DN 1100 studené smyčky HCP parogenerátorů JE Dukovany
- Oprava heterogenního svarového spoje odbočky primárního potrubí JE Temelín
- Oprava vad v hrdle DN 1200 svarového spoje č. 111 parogenerátorů JE Temelín
- Atestace přídavných materiálů řady Inconel 52 pro opravy TNR VVER 440 a 1000
- Oprava výměnou horní části primárního kolektoru HCP JE Dukovany s orbitálním svařovacím automatem Polysoude

Ve fázi rozpracování a např. zpracování potřebných studií jsou:

- Oprava korozního napadení nátrubků víka TNR typu VVER 440
- Opravy potrubí orbitálním automatizovaným způsobem
- Opravy potrubí a hrdel komponent metodou SWOL (Structural Weld Overlay) s použitím materiálu Inconel 52(M) a drátem typu AWS 309L, resp. Sv07Ch25N13
- Rešerše stavu jaderného opravárenství
- Pokračování vývoje technologie oprav TNR materiálem Inconel FM 52/52M
- Automatizace svařování oprav svaru DN 1100 PGV 440

Heterogenní svarový spoj DN 1100 PGV 440

Paralelně s řešením projektu opravného svařování TNR bylo nutné začít řešit opravy korozního praskání heterogenních svarových spojů JE Dukovany i JE Temelín. V roce 2012 byla vyvinuta unikátní technologie opravy svarového spoje hrdla DN 1100 parogenerátoru typu VVER 440 poškozeného korozí pod napětím v rozhraní heterogenního návaru. Do současnosti ŠKODA JS provedla 4 úspěšné opravy svarového spoje hrdla DN 1100 parogenerátoru JE Dukovany. Po mnoha letech monitorování bylo v roce 2012 rozhodnuto provozovatelem urychleně vyvinout a následně realizovat opravu svaru, jehož vady již dosahovaly kritické hodnoty šíření trhliny. Realizace opravy trvá cca 21 dní v režimu nepřetržitých směn. Obvod svarového spoje je téměř 3,5 metru a svařovaná tloušťka je 72mm.

Na přípravu opravy byla velmi krátká doba necelého roku. Bylo nutné provést řadu přípravných činností, které byly ve spolupráci s provozovatelem završeny úspěšnou opravou na konci roku 2012. Příprava opravy představovala mnoho dílčích kroků: vývoj vhodné technologie obrábění a obráběcího zařízení, výcvik personálu obrábění, výběr a výcvik svářečů, svaření kontrolního svarového spoje, nákup a dodání projektem předepsaných původních svařovacích materiálů, zpracování technické dokumentace opravy, a mnohé další činnosti. Jako nedílnou součástí vývoje opravy bylo provedení potřebných výpočtů včetně výpočtů deformací od svařování a výpočtů zbytkových napětí. Konstrukční řešení parogenerátoru neumožnilo provést předepnutí před svařením nového svarového spoje v takovém rozsahu, aby po celkovém smrštění svaru zůstal primární kolektor HCP v původní poloze před opravou. Protože nebylo předem známo, jaké hodnoty dosáhne smrštění, byla provedena analýza MKP následně ověřena na kontrolním svarovém spoji provedeném

v reálném měřítku. Současně s ohledem na omezenou možnost předepnutí byl navržen ve světě dosud nepoužitý systém on-line měřené a řízené tuhosti a deformace svarového spoje s pomocí tenzometrického měření a průběžného uvolňování předpětí ve svaru.

Při opravě nebylo aplikovatelné, na rozdíl od předehřevu, tepelné zpracování po svaření, které poškozují strukturní stabilitu heterogenních svarových spojů. S ohledem na krátký čas na přípravu nebylo možné řešit projektovou změnu a použití neoriginálních svařovacích materiálů, neboť zejména prokazování srovnatelnosti náhrad vůči původnímu projektovému řešení by vyžadovalo řadu nestandardních zkoušek materiálových charakteristik – fyzikálních a zejména únavových.

Nesmírně náročná byla příprava a výcvik svářečů zejména pro provedení přechodových návarů v poloze nad hlavou (obr. 1). V průběhu první opravy byl odebrán vzorek vady pro analýzy příčin poškození (obr. 2).

Nový svar odpovídá původnímu projektu a předpokládá se srovnatelná životnost s původním řešením. S ohledem na vysoké nároky na svářeče je v plánu automatizace procesu orbitálního svařování s využitím metody TIG s horkým drátem.

Inconel 52(M) pro opravy tlakové nádoby reaktoru

Jednou ze závažnějších oprav bylo poškození per šachty TNR JE Temelín v roce 2008. Poškození bylo jen v oblasti svarového spoje k austenitickému návaru vnitřní stěny TNR v její horní části a proto byla oprava provedena ručně původními svařovacími materiály (metodou TIG). Tato situace mimo jiné zintenzivnila úsilí ve ŠKODA JS na dokončení atestace vhodného přídatného materiálu pro případné opravy vad zasahující do základního materiálu pod úroveň antikorozičního návaru.

Na projektu se pracovalo v podstatě od roku 1998, kdy byl dokončen vývoj technologie oprav vnitřní části TNR typu VVER 440 MIG/MAG. Metoda opravy v té době předbýhala možnosti svařovacích automatů a pro své nedostatky zejména v oblasti neprůvarů a vnitřních vad nebyla dále rozvíjena. Přesto bylo provedeno značné množství zkoušek a byl položen moderní základ ve vývoji oprav hlavních komponent JE ve společnosti ŠKODA JS. Již v tomto období se zvažovalo použití materiálu na niklové bázi namísto dvou nebo tří různých materiálů použitých v původním projektu. S dnešním rozvojem počítačově řízeného el. oblouku v synergických procesech je opět tato metoda předmětem zájmu a potenciálního použití při opravném svařování některých komponent.

V dalším vývojovém kroku tak byla vybrána metoda svařování TIG a použit svařovací materiál obchodní značky Inconel FM 52 pro opravné svařování TNR VVER 440 z oceli 15Ch2MFA. Protože tyto nádoby jsou déle v provozu, předpokládal se pravděpodobnější výskyt vad u těchto nádob. Projekt byl zakončen v roce 2004 kladným stanoviskem ITI Praha.

Mezi lety 2012 až 2016 byl realizován navazující projekt atestace svařovacího materiálu Inconel FM 52/52M pro opravy TNR typu VVER 1000 z materiálu 15Ch2NMFA v rámci podpory Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) a s přispěním provozovatele JE.

V rámci projektu bylo kromě provedení řady atestačních zkoušek vybudováno experimentální robotizované pracoviště (obr. 3) s unikátními vlastnostmi on-line/off-line řízení procesu svařování při kladení jednotlivých svarových housenek do opravné kavity. Po nanesení každé svarové housenky je nutné laserovým skenerem nasnímat aktuální povrch a korigovat dráhu hořáku pro další průchod. Speciální experimentální program pro řízení vícevrstvého navařování s korekcí dráhy byl vyvinut na katedře kybernetiky ZČU. Výsledkem experimentu bylo přiblížení se reálné technologii opravy TNR a vyhovující výsledky kvality návaru (obr. 4) a potvrzení životaschopnosti této technologie oprav. Projekt byl završen atestací přídatného materiálu a jeho schválením jako přípustného pro případné opravy TNR VVER 1000 v rámci Sekce I Svařování Normativně technické dokumentace Asociace

strojních inženýrů. Ačkoliv se společně s atestací přídavného materiálu vyvíjel i potřebný proces svařování TIG, primárním úkolem byla materiálová atestace přídavného materiálu ve vazbě na základní materiál TNR VVER 1000. Z tohoto pohledu byl projekt završen úspěšně.

Činnosti byly vyvíjeny na základě události s poškozením per šachty JE Temelín a s vědomím, že doba provozu nemusí být rozhodující příčinou poškození. K případné realizaci oprav TNR je však ještě nutné učinit mnoho dalších kroků: dopracovat technologii oprav pomocí dálkového robotického manipulátoru odolného radiační zátěži, vyvinout technologii obrábění, potřebné NDT kontroly v průběhu opravy, metodiku pro atestaci technologie svařování aj. Značnou problematikou je legislativa a technické předpisy pro takto náročné opravy a v podstatě neexistence technického garanta české jaderné energetiky, kterým dříve byla ČSKAE koordinující výzkum a vývoj v dané oblasti.

Závěr

Byly nastíněny velmi stručně dva případy vývoje oprav. V prvním případě se jednalo o opravu heterogenního svarového spoje parogenerátoru VVER 440 a ve druhém případě o vývoj technologie a atestaci přídavného materiálu pro opravy vnitřní stěny TNR VVER 440 a VVER 1000. Oba případy představují náročné a rozsáhlé práce se zapojením mnoha technických profesí. Jaderné opravárenství představuje vysoce náročnou multi disciplinární oblast vyžadující značnou podporu v oblasti materiálového a technologického výzkumu. Zajištění schopnosti vyvíjet a provádět náročné opravy hlavních komponent JE vyžaduje úzkou spolupráci provozovatele a dodavatelů technologií, kvalitní koordinaci a značnou podporu z veřejných zdrojů. Tomu všemu je věnována patřičná pozornost v zemích aktivně rozvíjejících jadernou energetiku.

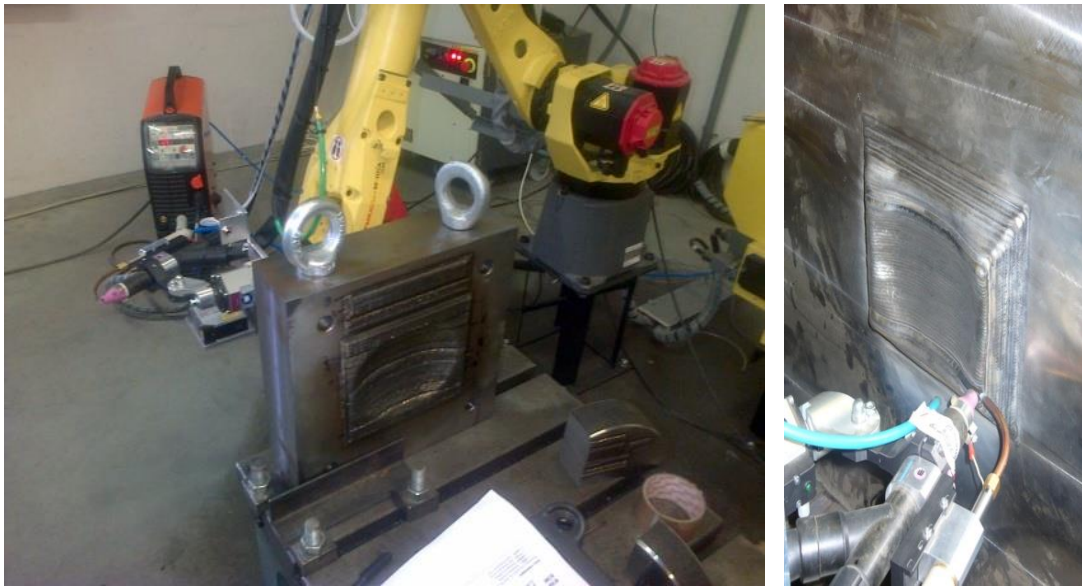
Pro řešení náročných oprav však neexistuje potřebná legislativa a jednoznačně definované technické kódy a tak jediným garantem jaderné energetiky u nás je dle současného přístupu legislativy provozovatel. Pro projekt VVER současně není možné přebírat postupy z jiných, nekompatibilních s projektem VVER technických kódů nebo bezhlavě do projektu přebírat „komerční“ normy Evropské Unie bez znalostí projektových souvislostí. Vývoj a realizace oprav tak v sobě skrývá mnohá rizika, která je nutné eliminovat budováním potřebného know-how a úzké spolupráce zúčastněných.



Obr. 1 Výcvik personálu na zkušebních stendech je nutností



Obr. 2 Pohled na vadu v průběhu jejího řezání a odběru vzorku



Obr. 3 Pohled na robotizované pracoviště při vývoji metody svařování materiálem Inconel FM52/52M pro opravy vnitřní plochy TNR a detailní pohled na vyplňování kavity



Obr. 4: Makrostruktura opravného návaru kavity materiálem Inconel FM 52/52M

Literatura

- [1] Kolektiv autorů ŠKODA JS (2004): *Opravné svařování TNR VVER 440*. Plzeň, technická zpráva ŠKODA JS a.s.
- [2] Ellinger J., Jandík V., (2004): *Výsledky kvalifikačních zkoušek svarového kovu Inconel 52*. Plzeň, technická zpráva ŠKODA JS a.s.
- [3] Dvořáková M., Konop R., Ellinger J. (2016): *Vývoj nové technologie opravného svařování provozovaných tlakových nádob jaderných reaktorů VVER 1000*. Plzeň, technická zpráva.

ANALÝZA ÚČINKOV TEPLOTNEJ STRATIFIKÁCIE MONITOROVANEJ SYSTÉMOM MONEZ PRI HODNOTENÍ ŽIVOTNOSTI POTRUBNÝCH KOMPONENTOV PRIMÁRNEHO OKRUHU

ANALYSIS OF THERMAL STRATIFICATION EFFECTS MONITORED BY SYSTEM MONEZ IN LIFETIME EVALUATION OF PRIMARY CIRCUIT PIPING COMPONENTS

Ivan Lopoš, Milan Mikuš a Marián Krajčovič

VUJE Trnava, a.s., Okružná 5, 91864 Trnava, Slovenská Republika

Abstrakt

Obsahom príspevku je aplikovanie výsledkov meraní, získaných z nového monitorovacieho systému MONEZ, ako vstupných parametrov vo výpočtových analýzach namáhania a únavového poškodenia vybraných potrubných komponentov primárneho okruhu JE V2 (Jaslovské Bohunice). MONEZ poskytuje údaje o tepelnom zaťažení kontinuálnym monitorovaním vonkajších povrchových teplôt, z ktorých sú vybrané namerané priebehy teplôt reprezentujúce históriu prevádzky počas celej palivovej kampane spojenú aj s výskytom teplotnej stratifikácie. Prezentované výstupy z realizovaných analýz sú zamerané na vyrovnávacie potrubie systému kompenzácie objemu a nátrubok potrubia napájacej vody parogenerátora.

The article contains application of measurement results obtained from a new monitoring system MONEZ as input parameters in computational stress and fatigue damage analyzes of selected primary circuit piping components of V2 power plant (Jaslovské Bohunice). MONEZ providing thermal load data by continuous monitoring of external surface temperatures of which are selected measured time history of temperatures representing the history of operation during the entire fuel campaign also associated with the occurrence of thermal stratification. The presented outputs from the performed analyzes are focused on pressurizer surge line and feed water inlet nozzle of steam generator.

Monitorovací systém MONEZ

Tepelná únava je jedným z dominantných degradačných mechanizmov v potrubíach jadrovej elektrárne (JE), ktorý je potrebné sledovať a následne vyhodnotiť, pretože môže významne ovplyvniť bezpečnosť a spoľahlivosť JE. MONEZ (MOnitorovanie NEšpecifikovaných Zaťažení) umožňuje kontinuálne sledovanie tepelného únavového zaťaženia potrubných systémov primárneho okruhu (PO) JE V2 (Jaslovské Bohunice). Monitoruje rozloženie teplôt prostredníctvom termočlánkov inštalovaných na vonkajšom povrchu potrubných komponentov. Bol nainštalovaný v roku 2015 počas plánovanej odstávky na 3. bloku a o rok neskôr (2016) aj na 4. bloku JE V2. Nahradil pôvodný monitorovací systém, ktorý sledoval tepelné zaťaženie od roku 1996.

Rozsah meraní bol definovaný s cieľom získať nevyhnutné informácie pre komplexné posúdenie tepelného zaťaženia, ktoré môže ovplyvniť životnosť potrubí. Pozornosť sa sústredila na miesta s vysokou pravdepodobnosťou výskytu nešpecifikovaného zaťaženia (teplotnej stratifikácie) a cyklických zmien. Zaťažujúce podmienky vyvolané teplotnou stratifikáciou nie je možné predpovedať, preto je potrebné ich dokladovať realizovaným kontinuálnym meraním tepelného zaťaženia počas prevádzky. Namerané priebehy teplôt slúžia ako vstupné údaje pri následných výpočtových analýzach tepelného namáhania a únavového poškodenia monitorovaných potrubných komponentov PO.

Monitorovanie a výber tepelného zaťaženia

Najvýznamnejšie cyklické zmeny tepelného zaťaženia spojené aj s výskytom stratifikácie boli zaznamenané vo vyrovnávacom potrubí systému kompenzácie objemu (VP KO) a v nátrubkoch potrubia napájacej vody parogenerátorov (NV PG). VP KO bolo monitorované pomocou 31 vertikálnych meracích rovín umiestnených na horizontálnych úsekoch potrubia s piatimi termočlámkami v každej rovine. Okrem toho bola nainštalovaná aj jedna horizontálna meracia rovina na dolnom (vertikálnom) nátrubku KO s dvomi termočlámkami. Celkovo bolo pre VP KO použitých 157 termočlánkov [1].

Potrubia NV PG boli monitorované pomocou 2 vertikálnych meracích rovín, z ktorých prvá (s piatimi termočlámkami) sa nachádzala v blízkosti nátrubku a druhá (s tromi termočlámkami) za prvým kolenom v smere od PG na horizontálnom úseku potrubia. Iba na jednom zo šiestich PG, bola nainštalovala ďalšia (tretia) doplnujúca meracia rovina (s tromi termočlámkami), ktorá mala preveriť prienik média (netesnou spätnou klapkou) v smere od PG. Jedným termočlámkom bola monitorovaná teplota plášťa PG. Celkovo bolo pre šesť potrubí NV PG použitých 57 termočlánkov [1].

Pri definovaní výpočtového zaťaženia hodnotených komponentov PO, sa zdokumentované meranie prevádzkových parametrov zredukovalo na výber niekoľkých významných nameraných priebehov teplôt a spolupôsobiacich tlakov, ktoré mali dostatočne reprezentovať (zmapovať) históriu prevádzky počas celej palivovej kampane. Tieto vybrané priebehy (v konkrétnych časových intervaloch), o ktorých sa predpokladalo, že by mohli mať vplyv na únavové poškodenie, boli charakterizované výraznou variáciou sledovaných parametrov spojenú aj s výskytom teplotnej stratifikácie. Vybrané namerané parametre teploty aj tlaku v identických časových intervaloch predstavovali vstupné parametre (okrajové podmienky) pre výpočtové analýzy namáhania a únavového poškodenia. Zo všetkých vybraných priebehov sledovaných parametrov, bola zostavená postupnosť významných nestacionárnych režimov, ktorá mala simulovať históriu prevádzkového zaťaženia.

Výpočtové hodnotenie účinkov tepelného zaťaženia

Analýza namáhania vybraných komponentov PO od účinkov nameraného tepelného zaťaženia sa realizovala na výpočtových modeloch tranzientnou termo-mechanickou analýzou pomocou metódy konečných prvkov (MKP). Výpočtové modely (VP KO a NV PG) vychádzali zo skutočnej geometrie a rozmerov posudzovaných potrubných komponentov PO pri súčasnom rešpektovaní mechanických a teplo-fyzikálnych charakteristík použitých materiálov. Súčasťou výpočtových modelov bolo aj zadefinovanie mechanickej interakcie s okolím (prvky uloženia: závesy, podpery) a napojenie na nadväzujúcu technológiu PO. Geometria a sieť konečných prvkov bola vygenerovaná pre-procesorom MSC.Patran a analýza namáhania (termo-elastické výpočty) bola realizovaná výpočtovým programom MSC.Marc od firmy MSC.Software. Cieľom výpočtov bolo analyzovať vplyv nameranej prevádzky (sprevádzanej aj výskytom teplotnej stratifikácie) na napätosť a cyklické poškodenie kritických miest hodnotených komponentov VP KO a NV PG.

Výstupom z výpočtových analýz pre každý významný nestacionárny režim (priebeh teplôt a spolupôsobiacich tlakov) boli priebehy napätí, ktoré sa stali podkladom pre vykonanie podrobnej únavovej analýzy. Pri analýze napätosti pre každé vybrané prevádzkové zaťaženie sa vyhodnocovali lokality (najexponovanejšie uzlové body) v analyzovaných výpočtových modeloch (viď. Obrázok č.1 a Obrázok č. 2), kde dochádza k najvýznamnejšiemu cyklovaniu napätí a dôsledkom toho aj k najväčšej kumulácii únavového poškodenia. Pre VP KO a potrubie NV PG bolo vybraných 11 reprezentatívnych uzlových bodov [2]. V každom z týchto uzlových bodov sa vyhodnocoval priebeh napätí v časovom intervale, ktorý prislúchal analyzovanému nestacionárnemu prevádzkovému režimu.

Najnepriaznivejšie hodnoty napätí boli pre VP KO zistené v oblasti dvojnásobnej odbočnice, konkrétne na prechode vnútorného priemeru hrdla VP do hlavného cirkulačného potrubia (uzol 1447) a v okolí T-kusu (na prechode vnútorného priemeru vertikálnej časti do horizontálnej – uzol 46815). Pre potrubie NV PG boli najnepriaznivejšie hodnoty napätí zistené v oblasti pripojenia rúrky (tepelnej chráničky) vnútorného rozvodu NV na nátrubok PG, ktoré boli zapríčinené okrem pôsobiaceho tepelného zaťaženia aj rozdielnymi teplotnými dilatáciami materiálu nátrubku PG a materiálu rúrky vnútorného rozvodu NV. Táto oblasť bola reprezentovaná uzlovými bodmi 17361, 29249 a 29268 [2].

Výsledky analýzy únavového poškodenia

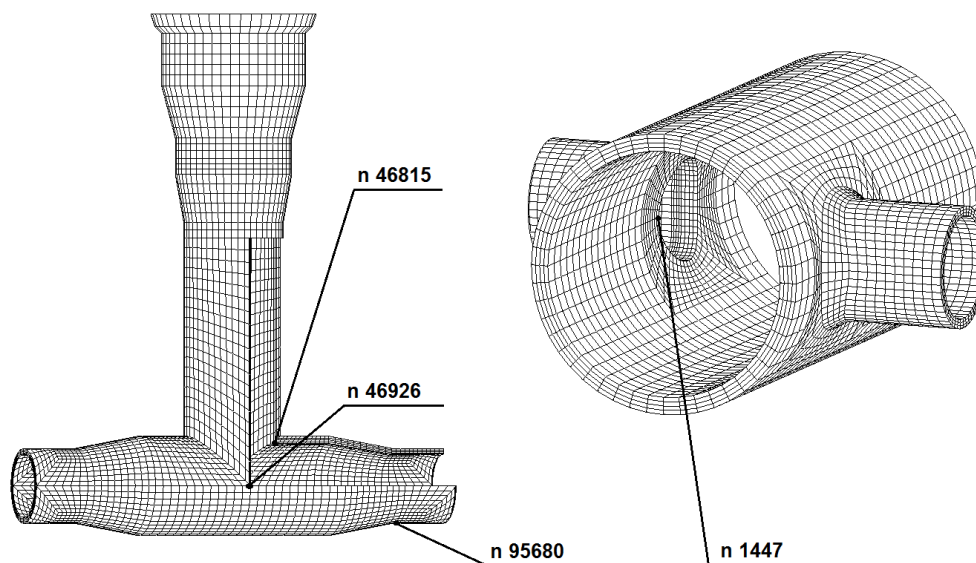
Analýza únavového poškodenia sa realizovala na základe vypočítaných zložiek napätí v reprezentatívnych uzlových bodoch VP KO a potrubia NV PG a zdokumentovanej histórie prevádzky. Výsledky analýzy reprezentujúce 32. palivovú kampaň potvrdzujú, že pre VP KO aj NV PG boli vypočítané minimálne hodnoty únavového poškodenia, ktoré nepresiahli hodnoty stotín percenta (viď. Tabuľka č. 1 [2]). Pre VP KO sa bod s najväčším vypočítaným poškodením nachádza na vnútornom povrchu dvojnásobnej odbočnice (uzol 1447) a pre NV PG na vnútornom povrchu nátrubku v oblasti pripojenia tepelnej chráničky (uzol 29268).

Výsledky výpočtov únavového poškodenia, získané z údajov realistických pevnostných analýz, pri aplikácii teplotných (aj tlakových) okrajových podmienok z nového monitorovacieho systému MONEZ potvrdzujú, že predchádzajúce hodnotenia (do roku 2015) boli realizované za veľmi konzervatívnych predpokladov. Bolo to zapríčinené predchádzajúcim monitorovacím systémom, ktorý vychádzal z meraní len v 6 vertikálnych meracích rovinách pre VP KO a len z jednej meracej roviny pre každé potrubie NV PG. Zvýšenie počtu meracích rovín, ktoré využíva MONEZ, umožnilo podrobnejšie popísať rozloženie teploty po dĺžke monitorovaných potrubných úsekov bez potreby odhadovania teploty vo vzdialenejších miestach od inštalovaných meracích rovín. Namerané parametre prevádzkového zaťaženia, ktoré poskytuje MONEZ sú preto neporovnateľne objektívnejšie a presnejšie ako pri prevádzke starého monitorovacieho systému.

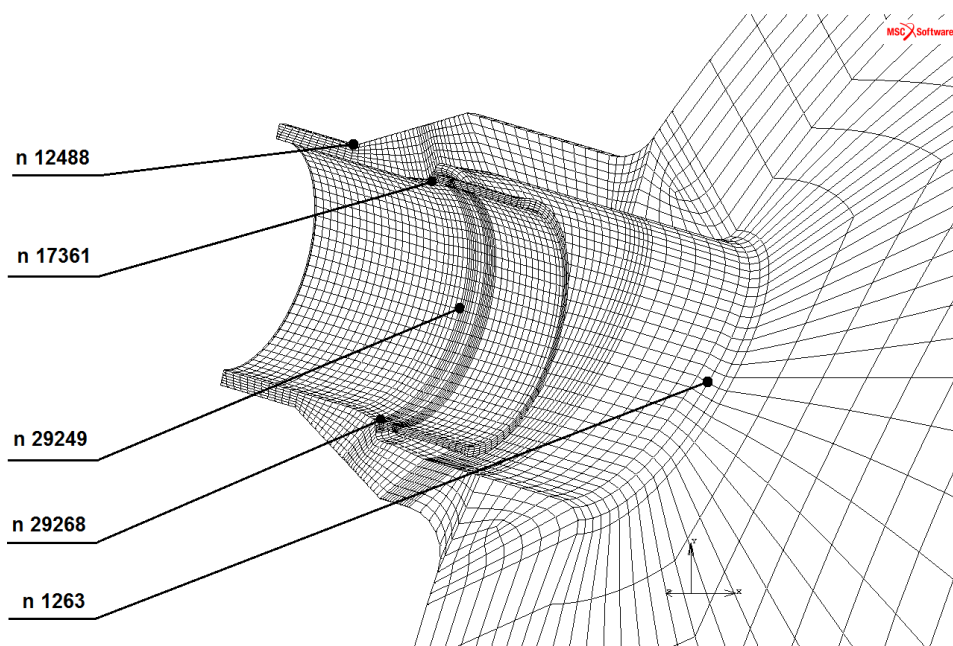
Ďalšia podstatná zmena sa udiala aj v spôsobe definovania zaťaženia a následného určenia únavového poškodenia. V predchádzajúcom období (do roku 2015) sa vyhodnocovanie zaťaženia realizovalo na základe štatistického spracovania meraní a aplikovania výsledkov len niekoľkých modelových pevnostných analýz pre vybrané reprezentatívne (typické) teplotné rozvrstvenia. V nových realizovaných hodnoteniach boli modelované a vyhodnocované skutočné prevádzkové zaťaženia, t.j. tak ako boli namerané (bez štatistickej redukcie). Preto získané výsledky vypočítaného únavového poškodenia sú výrazne presnejšie v porovnaní s predchádzajúcim konzervatívnym systémom vyhodnocovania tepelného zaťaženia.

Potrubný systém PO			
VP KO		NV PG	
Uzlový bod	Poškodenie (%)	Uzlový bod	Poškodenie (%)
1447	0,07258	29268	0,02850
95680	0,02416	29249	0,02520

Tabuľka č. 1 Vypočítané únavové poškodenie v reprezentatívnych uzlových bodoch VP KO a v nátrubku potrubia NV PG počas 32. palivovej kampane



Obrázok č. 1 Lokalizácia reprezentatívnych uzlových bodov výpočtového modelu VP KO



Obrázok č. 2 Lokalizácia reprezentatívnych uzlových bodov výpočtového modelu NV PG

Literatúra

- [1] Lopoš I., Krajčovič M. (2016): *Analýza životnosti vybraných komponentov primárneho okruhu EBO JE V2 pre obdobie dlhodobej prevádzky (VP KO a NV PG)*, Trnava: VUJE, a. s.
- [2] Lopoš I., Mikuš M. (2016): *Analýzy účinkov teplotnej stratifikácie vo VP KO a v nátrubkoch NV PG zaznamenatej systémom MONEZ pre hodnotenie životnosti komponentov PO*, Trnava: VUJE, a. s.

SOUČASNÝ STAV PROJEKTU HORIZON 2020 IVMR (UDRŽENÍ ROZTAVENÉHO CORIA UVNITŘ TLAKOVÉ NÁDOBY VVER 1000)

PRESENT STATUS OF THE HORIZON 2020 IVMR PROJECT (IN VESSEL MELT RETENTION INSIDE THE RPV FOR THE VVER 1000)

Jiří Žďárek, David Bátěk a Svatopluk Vlček

ÚJV Řež a.s.

Abstrakt

Jaderná energetika má za sebou tři těžké havárie, které se opakují s pravidelností téměř každých deset let. Je proto velmi důležité podpořit výzkumný projekt, jehož cílem je prokázat udržet roztavené Corium uvnitř tlakové nádoby reaktoru i pro reaktory s vyšším výkonem. Evropský projekt HORIZON 2020 IVMR má tento cíl. ÚJV Řež a.s. tento projekt iniciovalo a v současné době se projektu účastní 13 států EU a přibývají organizace mimo EU. ÚJV Řež a.s. vede Task č. 4. jehož cílem je postavit velkorozměrný experiment prokazující uchlazenost vnějšího povrchu TNR VVER 1000. V prezentaci uvedeme základní cíle celého projektu a současný stav velkorozměrného experimentu v ÚJV Řež a.s.

Nuclear energy already experience three severe accidents which are repeating almost every ten years. Therefore it is very important to support research project with key goal to confirm the ability to keep the melted Corium inside the RPV even for reactors with higher power. The European project HORIZON 2020 IVMR has this goal. The UJV Rez a.s. initiated this project and at present 13 EU countries are participating and also new countries outside the EU are joining the project. The UJV Rez a.s. is leading TASK 4 with goal to build the large scale experiment which will prove ability to cool the outside surface of the VVER 1000 RPV. In our paper key goals of the whole project will be described and also present status of the large scale experimental facility to be build at UJV Rez a.s.

1. Nejdůležitější získané výsledky v polovině trvání celého projektu.

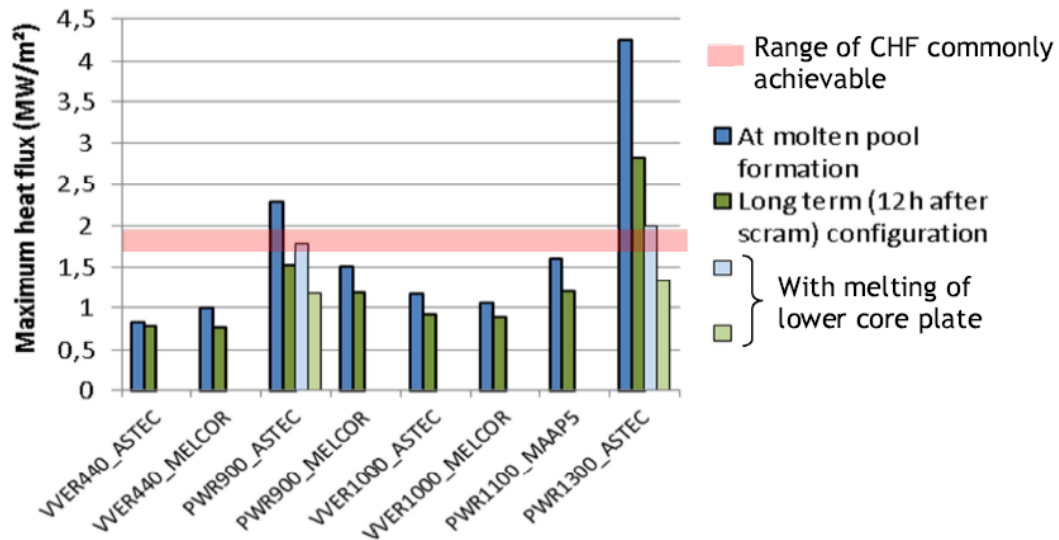
Analytické výpočty a použité kódy jsou velmi důležitou částí projektu. Zásadní současné poznatky je možné shrnout takto:

- Je identifikováno několik postupů zajišťujících zvýšení spolehlivosti při používání výpočtových kódů.
- Byly definovány perspektivy pro použití výpočtových kódů k určení zbytkové odolnosti stěny TNR po jejím výrazném roztavení (ablation).
- V současné době není dostatek spolehlivých creepových dat v oblasti teplot 350-600 °C. EdF předložilo návrh možných experimentů.
- Předběžné výpočtové hodnocení integrity stěny TNR provedené EdF prokázalo, že zbytková tloušťka stěny TNR cca 16 mm (odpovídající působení tepelného toku 2 MW/m²) je stále dostačující i při tlaku 30 bar.
- CFD kódy je bude nutné používat k náhradě dosud neprovedených experimentů, zejména pro hodnocení vlivu tenkých vrstev v bazénu Coria i k celkovému 3D hodnocení stavu.
- Výše uvedené poznatky byly již použity v revidované metodologii pro hodnocení IVR.

Zcela zásadní poznatky jsou:

- Nejvíce relevantním parametrem pro hodnocení potenciálního úspěchu strategie IVR není výkon reaktoru, ale poměr hmoty paliva k hmotě oceli (ocel, která je nakonec rozpuštěna v bazénu Coria). Na základě tohoto hodnocení je možné již nyní

jednoznačně konstatovat vysokou pravděpodobnost úspěchu aplikace IVR pro VVER 1000. Porovnání pro několik typů JE na následujícím obr. č. 1.



Obr. č. 1. Porovnání různých typů JE s CHF pro okamžitý a ustálený stav

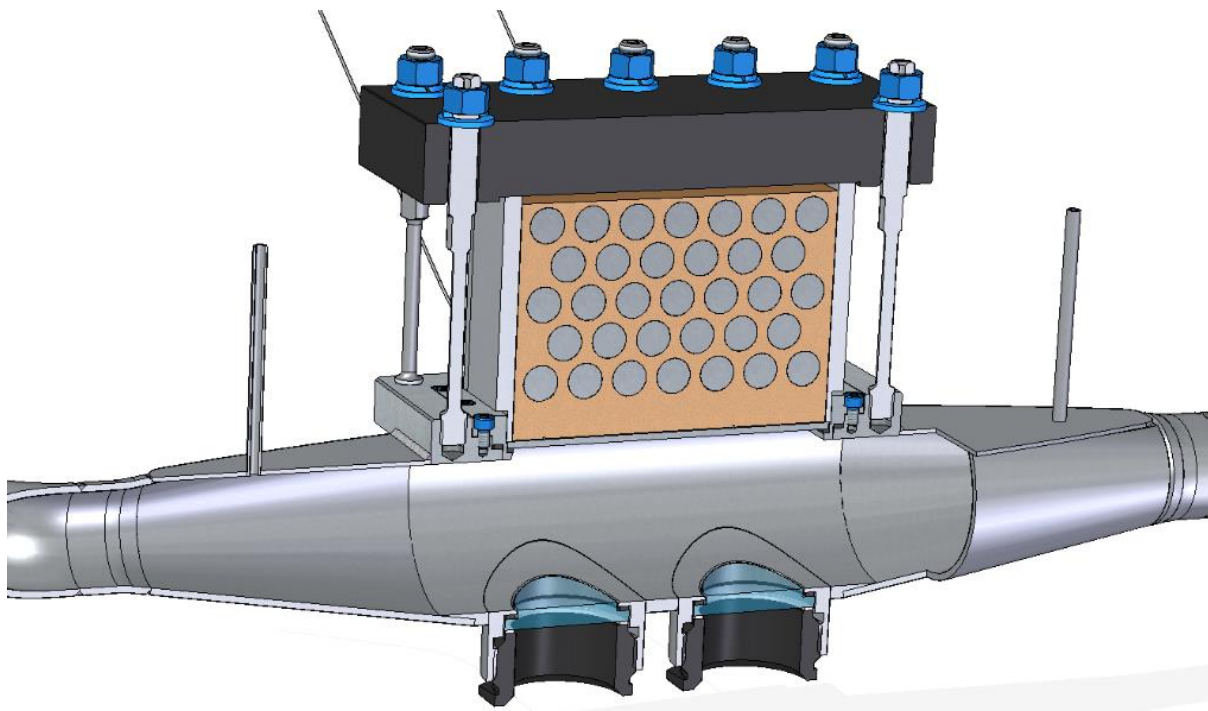
- Pro reaktory vyšších výkonů, simultánní vstřik chladícího media do TNR se simultánním chlazením vnějšího povrchu TNR se ukazuje jako relevantní opatření snižující intenzitu fokusačního efektu. Podmínky vstřiku je však nutné ještě prozkoumat (pasivní systémy, optimální flow rate).

Kromě uvedených důležitých výsledků analytických výpočtů a hodnocení je prováděno velké množství malých experimentů s cílem lépe definovat podmínky v bazénu Coria při stratifikaci s vytvářením různých mezi vrstev. Velká pozornost je rovněž věnována vlivu stavu povrchu TNR na charakteristiky odvodu tepla. EDF velmi aktivně sleduje vliv oxidace vnějšího povrchu.

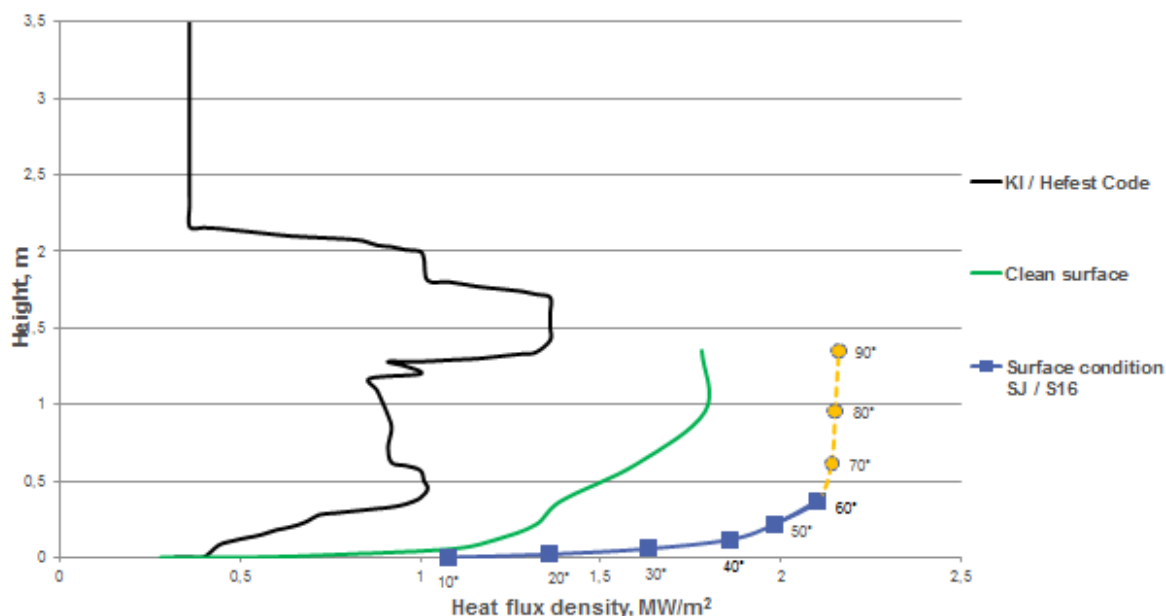
2. Výsledky UJV Řež a.s.

2.1. Výsledky na malém experimentálním zařízení BESTH

Experimentální zařízení BESTH bylo vybudováno na základě podpory Grantové agentury v projektu TAČR Beta. Cílem bylo provést experimenty s různým náklonem, ověřit technologii svaření bloku mědi s ocelí a rovněž provést ověření úpravy povrchu na hodnoty kritického tepelného toku. Základní schéma umístění zkušební vzorku v chladicím kanále je na obr. č. 2, získané výsledky v porovnání čistého povrchu a povrchu s úpravou jsou na obr. č. 3.



Obr. č. 2. Schéma umístění vzorku v chladícím kanále

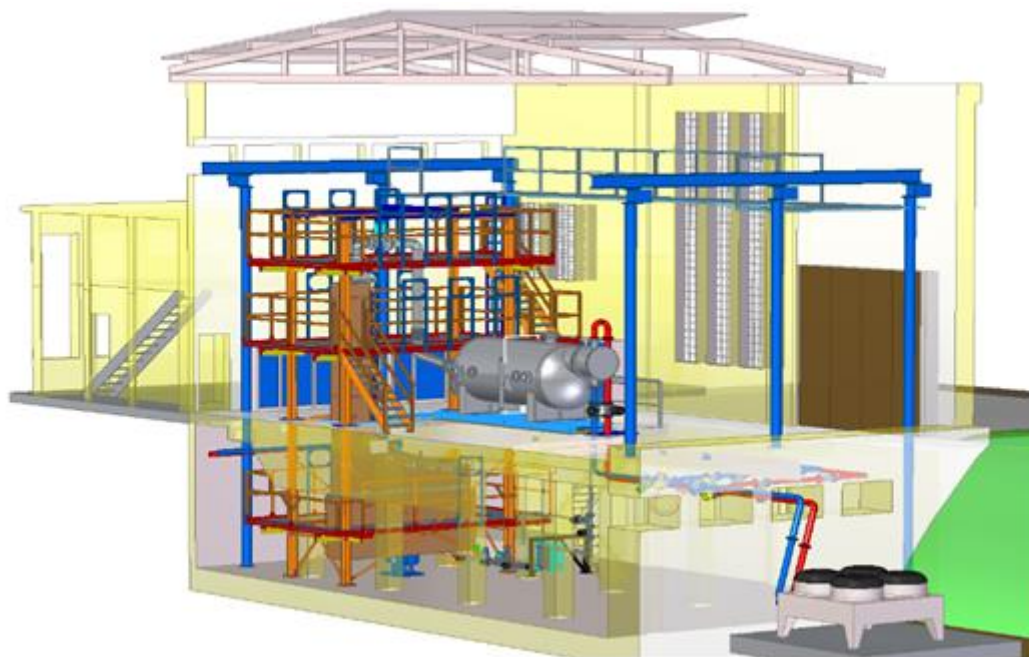


Obr. č. 3. Základní porovnání čistého povrchu a povrchu s novou technologií úpravy povrchu s výpočtem stabilizovaného tepelného toku.

2.2. Principiální design velkorozměrného experimentu THS-15

Návrh velkorozměrného experimentu plně respektuje doporučení z již provedeného experimentu ULPU pro WEC AP 1000. Zejména je nutné přesně dodržet rozměry a tvar semieliptického dna a válcové stěny a rozměry šachty reaktoru. Dále je nutné přesně simulovat přívod vody do šachty a odvod páry. Aby bylo možné simulovat různé hodnoty tepelných toků jak z hlediska jejich velikosti, ale i polohy po celé výšce kanálu, je k dispozici celkem 17 regulovatelných topných sekcí s celkem 1200 topnými patronami a přes 100 děr pro umístění termočlánků. V jedné je i možnost umístění speciálních opto sond k měření množství objemu bublin. Chladicí kanál je dimenzován na šířku 150 mm. Je možná montáž

i demontáž celého kanálu ve dvou sekcích, což umožní provedení experimentů s čistým a upraveným povrchem, dále pro obě varianty s deflektorem a bez deflektoru. Schéma celého zařízení je na obr. č. 4.



Obr. č. 4. Schéma THS-15

2.3. Cíle pro rok 2017

Je dokončena výroba všech topných segmentů mědi s ocelí s otvory pro topné patrony a termočlánky. Probíhá výroba chladicího kanálu, která má být dokončena do konce srpna. Následně bude zahájena montáž ve zkušební hale, včetně instalace primárního i sekundárního okruhu. Kondenzátor je již vyroben a instalován v hale. Celá instalace kanálu, včetně elektroinstalace bude dokončena do konce roku 2017.

2.4. Cíle pro dokončení projektu HORIZON 2020 IVMR

Na základě již provedených analytických výpočtů a expertních znalostí máme vedením celého projektu potvrzeny kritické hodnoty tepelných toků, které musíme být schopni na THS-15 dosáhnout pro stabilizovaný i okamžitý průběh v různých výškách celé tlakové nádoby. Návrh THS-15 včetně osazení tepelnými patronami umožní dosáhnout požadované tepelné toky. Experimenty provedeme s čistým i upraveným povrchem s deflektorem a bez deflektoru. Vzhledem k náročnosti všech experimentů z hlediska životnosti topných elementů, musíme být schopni zajistit i případnou výměnu topných patron.

3. Závěr

Experimentální zařízení THS-15 splňuje požadavky projektu HORIZON 2020 IVMR. Všechny dosud provedené velké experimenty v USA, Korea a Čína nemají komplexní řešení, které je navrženo a bude realizováno s THS-15. Tento fakt by měl výrazně posílit aplikaci IVMR na stávajících VVER 1000, ale i potenciál aplikace pro nově budované JE.

PŘÍČINY PORUCH PARNÍCH TURBÍN

CAUSES OF STEAM TURBINE MALFUNCTION

Jan Fiedler

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
Technická 2, 616 69 Brno, ČR
tel.: +420 541 142 574
e-mail:fiedler@fme.vutbr.cz

Abstrakt:

Příspěvek se zabývá nejčastějšími příčinami poruch parních turbín z pohledu soudního znalce. Pečlivá analýza poruch a havárií je důležitým faktorem zvyšování spolehlivosti provozu parních turbín a mají o ni zájem jak provozovatelé, tak zejména výrobci parních turbín. Autor analyzuje poruchy na skutečných případech, které řešil a hledá kořenové příčiny jejich vzniku. Současně rozebírá možnosti, jak eliminovat podobné havárie v budoucnosti. Závěrem uvádí několik vlastních obecných poznatků ze své praxe.

The paper deals with the most common causes of steam turbine malfunction from the point of view of a court expert. Careful analysis of failures and accidents is an important factor in increasing the reliability of steam turbine operation and is of interest to both operators and steam turbine manufacturers. The author analyses the malfunctions in the real cases he solved and looks for the root causes of their occurrence. At the same time, he discusses ways to eliminate similar accidents in the future. In conclusion, he presents some of his own general findings he collected during his practice as a court expert.

Úvod

Energetika je důležitý obor a neočekávané výpadky energetických centrál mohou mít negativní vliv ve všech ostatních sférách života člověka. Každá centrála je složitý technický systém vzájemně provázaných zařízení, kde špatné dimenzování nebo provozování jednoho článku soustavy může mít negativní vliv na celou energetickou centrálu. Proto je základním požadavkem kladeným na všechny komponenty energetických zařízení spolehlivost, bezpečnost a bezporuchový provoz [1].

Parní turbína je srdcem každého energetického provozu a jsou na ni v současnosti kladeny rozporuplné požadavky: vysoká účinnost, bezporuchový spolehlivý provoz při dlouhé životnosti a velké flexibilitě provozu. To vše při ekonomickém tlaku na cenu turbíny a její pravidelný servis. Je nutno si uvědomit, že rotační tepelný stroj má některá konstrukční specifika oproti běžnému strojírenskému výrobku:

- vysoké obvodové rychlosti a otáčky hmotných rotorových soustav
- malé radiální a axiální relativní vůle mezi rotorem a statorem
- vysoké teploty pracovního média a nutnost respektování tepelné roztažnosti dílů

Pokud nejsou výše uvedené zásady respektovány při návrhu konstrukce nebo při provozování turbíny, tak vždy dochází k nebezpečným stavům. Ne vždy vedou hned k havárii, často dojde pouze k nenávrhovému režimu bez poškození.

Vyšetřování havárií parních turbín je tedy většinou obtížné, protože málokdy je od začátku jednoznačná kořenová příčina. U tak složitého celku, jako je parní turbína s příslušenstvím může za provozu dojít k souběhu několika podlimitních stavů, při nichž není překročena žádná mezní veličina [1]. Přesto občas vznikne poškození nebo havárie celého turbosoustrojí.

Od roku 1980 sbíral autor příspěvku zkušenosti v konstrukci parních turbín v První brněnské strojírně Brno a od roku 1993 i jako učitel opět v oboru parní turbíny na VUT

v Brně. Dodnes vypracoval celkem 138 expertních technických zpráv o poškození parních turbín. Od roku 2002, kdy byl jmenován soudním znalcem pro obor „Energetika – parní turbíny“, provedl dosud celkem 50 znaleckých posudků. Poznatky v dalších kapitolách vycházejí z těchto celoživotních zkušeností [2].

Rozdělení poruch podle příčiny – odpovědnost nese výrobce:

Výrobce parní turbíny bývá pravidelně renomovaná strojírenská společnost s dlouholetou tradicí a zkušenostmi. Je hrdá na svoji minulost a konstrukční škola každé firmy je na první pohled patrná. Osvědčené konstrukční uzly parních turbín jsou dlouhodobě odzkoušené stovkami instalací a dlouholetým provozem. Vlastní projektant odpovídá za „turbínový ostrov“ se všemi návaznostmi. Uvádění do provozu u zákazníka probíhá pod dohledem interních expertů s mnohaletými zkušenostmi. Výše uvedené skutečnosti jsou i jedním z důvodů, proč se v turbinářském světě těžko prosazují nové firmy bez historie.

Havárie, za které nesl jednoznačně vinu výrobce, se vyskytovaly velmi zřídka a byly ve firmě podrobovány detailnímu rozboru s jasným poučením do budoucna. Ovšem v 21. století i renomované společnosti procházejí ekonomickými transformacemi s personálními dopady. Pokud je narušena kontinuita přenášení firemních zkušeností, potenciálně vznikají zejména tyto okruhy možných poruch a havárií zaviněné jednoznačně výrobcem - dodavatelem:

- Chyby celkové koncepce (projekt, bilanční výpočet, návaznosti)
- Nevhodnou konstrukcí částí (lopatky, ucpávky, uložení skříně)
- Nevhodným výběrem komponent (armatury, ložiska, motory)
- Chybami při výrobě a montáži (obrábění, vůle, ustavení stroje)
- Materiálovými vadami (licí blány, kvalita materiálu, dodavatelé)
- Uvádění do provozu i po GO (zkoušky, vady ustavení a připojení)

Rozdělení poruch podle příčiny – odpovědnost nese provozovatel:

Provozovatel podle zkušeností autora [2] odpovídá za cca 70% všech poruch a havárií parních turbín v elektrárnách a teplárnách. Není to tím, že by byl na technicky horší úrovni, než výrobce turbíny, ale u provozovatele je turbína desítky let a tak se provozní problémy na jedné turbíně sčítají po celou dobu životnosti.

Životnost parní turbíny se počítá v desítkách let (obvykle 40 roků), ale vypracovával jsem posudek na parní turbínu konstrukce PBS, která byla vyrobena v roce 1953 a stále je v provozu. Kromě toho se v posledním desetiletí výrazně změnila i podmínky provozování starších turbín v souvislosti s přednostním nasazováním obnovitelných zdrojů energie (OZE) a neodpovídají původnímu určení konkrétních turbín v elektrizační soustavě ani historickým zadávacím parametrům.

Nejčastější příčiny poruch turbín, za které má odpovědnost provozovatel jsou:

- Překročení doby životnosti, zanedbání údržby (únava materiálu, lomy) – Obr. 1
- Nečistoty v páře (zasolení a cizí předměty) – Obr. 2
- Nekvalitní olej + nečistoty
- Atypickým provozem turbínového zařízení:
 - Pochybení obsluhy (vzdělání, provozní předpisy)
 - Požadavky na regulaci soustavy s ohledem na OZE
 - Najíždění, odstavení, dlouhý chod naprázdno
 - Kolísání parametrů ucpávkové páry x zahlcení - odvodnění
 - Přestřik a zpětné proudění páry z NTO, nefunkční klapky

Vybraná typická příčina havárií parních turbín:

Jednou z nejčastějších příčin poškození nebo i havárie parní turbíny je kovový dotyk mezi točícím se rotorem a statorem [2]. Takový druh poruchy může způsobit jak výrobce, tak i provozovatel z mnoha různých příčin. Průběh poškození může být od lehkého „rubbingu“ až po fatální havárii s totálním poškozením obou částí. I zde platí, že existují méně a více odolné konstrukce různých uzlů.

Obecně lze potvrdit, že děj „zadírání“ je nevratný a třecí teplo vznikající v místě dotyku roztahuje obě části za rotace proti sobě do stále se zmenšující mezery – následky se v čase pouze zhoršují. Pro zmírnění následků bývá preventivně konstrukčně jedna z částí upravena tak, aby její rychlé a úplné zničení nepoškodilo protikus. Prevence tohoto typu poškození je známa, přesto k popsáním haváriím dochází, protože dotyk mezi rotorem a statorem za provozu bývá až sekundárním jevem nějaké primární (kořenové) příčiny. Dotyk za provozu včetně najíždění a odstavování turbíny nastává z více funkčně zcela odlišných důvodů:

- A. Postupné vymezení vůlí a nedovolené posuvy obvykle znamenají nejprve zvýšené vibrace rotoru a následně dotyk různé intenzity. Důvodem mohou být nejčastěji:
 - Nevhodné ustavení TG na základu
 - Tepelné dilatace částí turbíny (nebezpečný je chod naprázdno) – Obr. 3
 - Tepelné dilatace potrubí – nedovolené síly a momenty od zavěšení
 - Přestřík vody do skříně nebo ucpávek
 - Špatná funkce odvodnění nebo zpětné klapky
- B. Pokud dojde k defektu přímo na rotorové soustavě (lopatka, spojka, ložisko, lom rotoru), je zvýšení vibrací s dotykem okamžité. Následky mohou být od přechodného zvýšení vibrací (než se vyláme celá řada krátkých oběžných lopatek) bez přerušování provozu, až po vážnou havárii s následnou interakcí se zbytky ulomených hmotných lopatek a se sekundárním poškozením ložisek a satorových částí skříně.

Závěr

V příspěvku byly shrnuty obvyklé příčiny havárií parních turbín podle zkušeností soudního znalce z praxe. Jednalo se o turbíny provozované v České republice, na Slovensku, v Polsku, Maďarsku, Švédsku a zemích bývalého Sovětského svazu. Byly zde vytipovány potenciálně nebezpečné konstrukční uzly a zejména činnosti související s návrhem a provozem turbín. U většiny havárií byla původcem souhra několika nepříznivých faktorů.

Zkušenosti lze shrnout do několika obecných pravidel, která mohou sloužit jak výrobcům parních turbín, tak zejména provozovatelům:

- Konstrukce kvalitní parní turbíny vychází z osvědčených funkčních celků, novinky jsou vytvářeny postupným vývojem. Projektové řešení parní turbíny musí respektovat návaznosti na další zařízení ve složitém celku strojovery a celé energocentrály
- Při konstrukci nezapomenout na lidský faktor = odolnost turbínového zařízení proti chybám člověka
- Konstrukce turbíny je výrazně ovlivněna kromě fyziky a mechaniky i cenou. Proto pozor na zdánlivě laciná řešení a unáhlené neověřené unifikační kroky
- Dbát na odborné vzdělání obsluhujícího personálu a zejména porozumění fyzikální podstatě dějů, které se odehrávají za všech provozních stavů uvnitř turbíny
- Dodržovat provozní předpisy výrobce a nedovolit neodbornou manipulaci se zařízením, kdy obsluha nezná všechny souvislosti. Jinými slovy: to co si může

dovolit zkušební technik výrobce při uvádění turbíny do provozu, to nesmí neproškolený personál nikdy zkoušet

- Velmi zjednodušeně, ale bohužel pravdivě k minulosti: ještě před dvaceti roky byly turbíny servisovány v podstatně kratších intervalech GO navíc zkušenými vlastními zaměstnanci provozovatele. Odborná úroveň externího servisu (mimo nabídky servisu přímo od výrobce) může být v současnosti nejistá
- Pro energetické provozy dnes v celé EU vzhledem k dotační politice bohužel platí: maximalizovat podporovanou výrobu elektrické energie a nabízet systémové služby. Otázkou je, zda jsou pro takový typ provozu připraveny starší parní turbíny? Nevzniká tak potenciální riziko jejich poruch? Jak se tento způsob provozu projeví na životnosti?

Literatura:

- [1] Bradáč, A. a kol.: *Soudní inženýrství*, CERM Brno 1999, ISBN 80-7204-133-9
- [2] Fiedler, J.: *Znalecké posudky 2002 až 2017 dle č.j. M-1436/2002 pro základní obor: ENERGETIKA, odvětví tepelné turbíny*



Obr. 1: Překročení doby životnosti



Obr. 2: Zasolení lopatek



Obr. 3: Důsledek ventilace VT lopatkování při chodu naprázdno

VÝPOČET ŽIVOTNOSTI NĚKTERÝCH TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ČÁSTÍ SPALOVACÍCH TURBÍN

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r. o., Křenová 65, 602 00 Brno, CZ,
e-mail: vesely@ekolbrno.cz

Abstrakt:

I při stacionárních podmínkách provozu spalovací turbíny vznikají v plamenci spalovací komory nerovnoměrná teplotní pole, která jsou příčinou vzniku teplotních napětí a deformací. To může v některých případech ohrozit provoz spalovací komory a to převážně tam, kde v důsledku cyklického namáhání dojde ke kumulaci poškození a vzniku trhlin. V tomto článku budeme analyzovat stacionární teplotní pole pro plamenec spalovací komory, která pracuje na zemní plyn a jejíž geometrická konfigurace je známá. Bude předveden způsob výpočtu teploty stěny plamence zatížené radičním tepelným tokem od plamene a chlazeným závojem chladicího vzduchu. Jedná se o kombinovanou úlohu výměny tepla na stěně. Budou představeny jednotlivé tepelné toky a rovnice tepelné rovnováhy, ze kterých budou vypočteny teploty stěn. Dále bude představen výpočet teplotního a napěťového pole plamence a provedena analýza silových a deformačních napětí. Životnost plamence bude posuzována s ohledem na nízkocyklovou únavu a creep.

Even with the stationary conditions of the operation of the gas turbine, uneven temperature fields arise in the flue tube of the combustion chambers, which are the cause of temperature stresses and deformations. This may in some cases compromise the operation of the combustion chamber, especially where the accumulation of damage and the cracking occur due to cyclic loading. In this article we will analyze the stationary temperature field for the flue tube of the combustion chamber which operates on natural gas and whose geometrical configuration is known. There will be shown a method of calculating the temperature of the flue tube wall loaded by the radiation heat flux from the flame and the cooled by cooling air veil. It is a combined task of heat exchange on the wall. Individual thermal flows and equilibrium thermal equations from which wall temperatures will be calculated will be presented. In addition, the calculation of the temperature and stress field of the flue tube will be presented and an analysis of force and flow stress will be performed. The life of the flue tube will be judged with respect to low cycle fatigue and creep.

Charakteristika řešené úlohy

Mimo start a odstavení pracuje spalovací komora převážně ve stacionárním režimu, kdy termodynamické a aerodynamické parametry v lokálních místech jsou nezávislé na čase. To platí jak pro průmyslové aplikace, tak v letectví. Přitom ve stacionárním provozu pracuje spalovací komora po většinu doby své životnosti. Teplotní napětí vznikají v tomto případě v důsledku axiálních nebo obvodových nerovnoměrností teplot plamence, hořáků, pláště, zapalovačů, držáků, čela nebo jiných částí. Přitom tato nerovnoměrnost je generována především nerovnoměrností radičních a konvektivních tepelných toků z plamene do uvedených funkčních částí a celků. Radiální nerovnoměrnost je způsobena nerovnoměrným radiálním rozdělením paliva nebo vzduchu na vstupu do spalovací komory. To souvisí u kapalných paliv s radiální charakteristikou trysek, nebo nerovnoměrným rozdělením plynného paliva po obvodě, které je dáno hlavně nepřesností výroby přívodu a rozvodu plynu.

U průmyslových aplikací nezávisí příliš na axiální délce plynové turbíny a lze tedy vstupní část komory navrhnout tak, aby rozložení rychlostí ve vstupních průřezích pro přívod primárního, směšovacího a chladicího vzduchu bylo rovnoměrné.

Termodynamické parametry oběhu a geometrie plamence a kovaného kroužku

Spalovací turbína o spojkovém výkonu $P = 10000$ kW spaluje zemní plyn. Teplota paliva je

$t_B = 25$ °C, výhřevnost paliva $H_u = 49172$ kJkg⁻¹. Teplota spalin před turbinou je $t_3 = 1031$ °C, stlačení kompresoru je $\varepsilon = 18$. Parametry oběhu plynové turbíny jsou na obrázku 1. Spalovací turbína je osazena 11ti spalovacími komorami typu CAN v souproutém provedení. Každá spalovací komora je osazena čtyřmi kruhovými hořáky a základní geometrie jedné spalovací komory je na obrázku 2. Plamenec spalovací komory sestává z kovových kroužků (segmentů), které jsou chlazeny závojem chladicího vzduchu. Primární oblast spalovací komory je opatřena čtyřmi kruhovými hořáky 9 se šířkou stabilizátorů $B = 16$ mm a s charakteristickým součinitelem ucpání průřezu (viz obr. 2)

$$\frac{B}{H} = 0,6 \quad [1]$$

kde B je šířka stabilizátoru a H je vzdálenost os stabilizátorů.

Předpoklady řešení

Spalovací komora je adiabatická. Sálavou energii z plamene na stěnu emituje izotermická vrstva plynu s efektivní teplotou T_{EFI} , která se počítá lokálně v každé zóně.

Systém plamen – stěna je ve stavu termodynamické rovnováhy a plamen a stěny lze považovat z hlediska přenosu tepla za povrchy šedé.

Systém je stacionární a nedochází ke změnám teploty stěn plamence v čase.

Plamen se vyznačuje pohlcovací schopností, kterou vyjadřuje integrální součinitel zeslabení záření $K = K_{SA} + K_V$, který globálně charakterizuje celkové vlastnosti zeslabení vrstvy plynu sazemi a tříatomovými plyny.

Je přijata koncepce ekvivalentní tloušťky sálající vrstvy plynu S_{ekv} .

Integrální pohltivost vrstvy plynu je

$$\alpha_1 = 1 - \exp[-(K_{SA} + K_V)S_{\text{ekv}}] \quad [2]$$

Při stavu termodynamické rovnováhy a pro šedý povrch je integrální pohltivost plamene rovna integrální emisivitě plamene. Vnitřní stěna plamence je chlazená závojem chladicího vzduchu, který se přivádí do každého segmentu soustavou otvorů. Otvory mají průměr d . Ostatní geometrické parametry kovaného kroužku jsou na obrázku 3.

Další podrobnosti lze najít v [1].

Výpočet teplotního a napět'ového pole segmentu č. 5 pro závoje chlazení

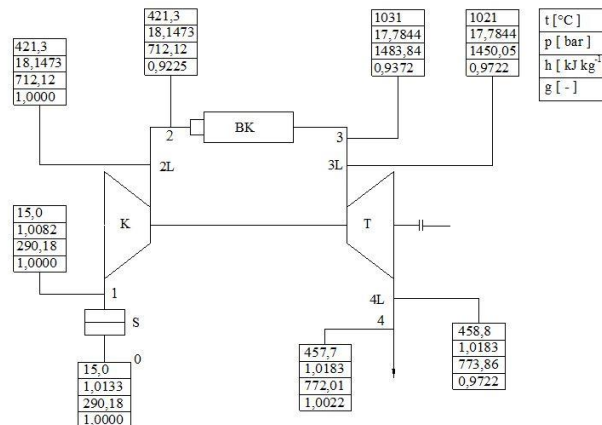
Na obr. 4, 5 je znázorněno napět'ové pole segmentu č. 5. Výpočet teplotního pole představuje složenou úlohu přestupu tepla, kde je uvažováno se sálavým tokem z plamene na plamenec, konvektivní přestup tepla na vnitřní straně plamence, vedení tepla stěnou, sálavým tokem z vnitřní strany plamence na vnitřní stranu pláště a konvekcí na vnější straně plamence. Výpočet napět'ového pole byl proveden programem RELAX, který je popsán ve [3]. Materiál plamence je podle staré normy ČSN 41 7246 označen 17 246.4, podle nového označení X10CrNiTi18-10. Výsledky výpočtu jsou na obr. 4, 5. Další podrobnosti lze najít ve [2].

Hodnocení teplotních napětí, závěr

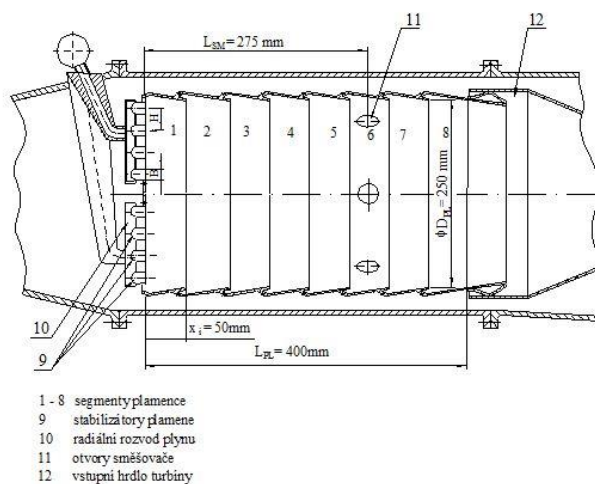
Teplotní napětí jsou zvláštním případem napětí deformačního původu. Při jednorázovém působení teplotních napětí v tažném materiálu k destruktci nemůže dojít. Při opakovaném působení teplotních napětí však dochází k tzv. nízkocyklové (tepelné) únavě materiálu. Pro

představu o působení nízkocyklové únavy jsou na obrázku 6 zobrazeny únavové křivky materiálu 17 246 při teplotě 600 °C. Na vodorovné ose je vyneseno počet cyklů do porušení N, na svislé ose je vynášeno lineárně (podle Hookeova zákona) vypočtené napětí.

Na obr. 5. 6 jsou znázorněna napěťová pole, která vznikají při axiální nerovnoměrnosti teplot segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladícího vzduchu. Je zřejmé, že maximální hodnota napětí v obvodovém směru dosahuje hodnoty kolem 1000 MPa. Z křivky nízkocyklové únavy pro čisté teplotní namáhání (viz obr. 6) je zřejmé, že pro dané napětí lze dosáhnout životnosti 5000 cyklů, což je hodnota naprosto vyhovující, poněvadž za jeden cyklus lze považovat zapálení a odstavení spalovací komory.



obr. 1: Schéma oběhu plynové turbíny spalující zemní plyn se vstupní teplotou spalin do turbíny $t_3 = 1031$ °C a stlačením $\varepsilon = 18$



obr. 2: Základní geometrie spalovací komory typu CAN pro spalovací turbínu s teplotou spalin před turbínou $t_3 = 1031$ °C a stlačením $\varepsilon = 18$. Palivo zemní plyn. Základní parametry:

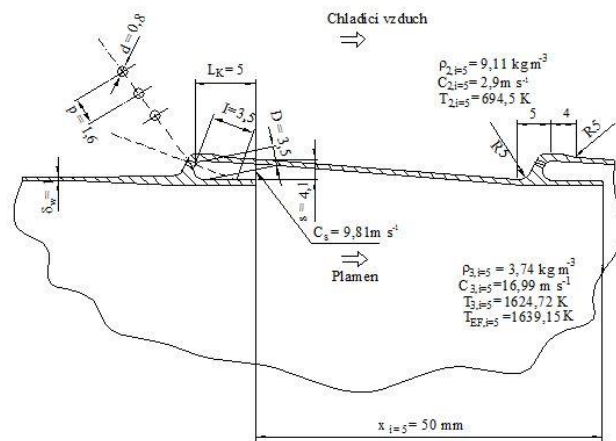
$$p_2 = 1,814 \text{ MPa}$$

$$t_2 = 421,3 \text{ °C}$$

$$t_B = 25 \text{ °C}$$

$$f_{\text{stech}} = 0,058768$$

$$\sigma_H / \sigma_C = 0,3339; H_u = 49172 \text{ kJkg}^{-1}$$



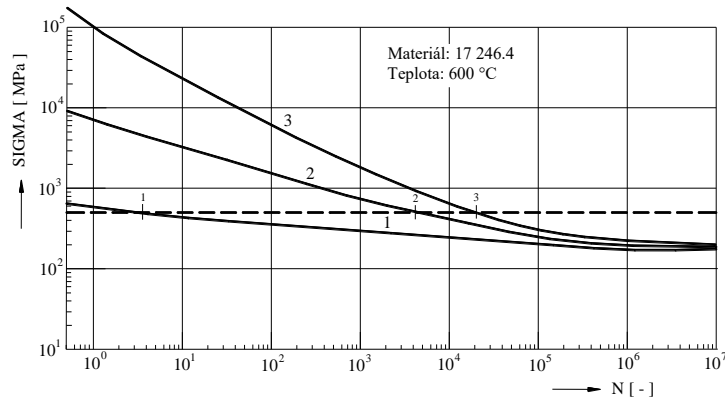
obr. 3: Geometrie kovaného kroužku chlazeného závojem chladicího vzduchu. Geometrický parametr $M = 0,467$. Všechny délkové rozměry jsou v mm.



obr. 4: Detail pole ekvivalentního napětí podle Hencky-Misese- Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Výseč segmentu dle obr. 3 Napětí jsou uvedena v MPa.



obr. 5: Detail pole obvodových napětí v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu Napětí jsou uvedena v MPa.



obr. 6: Křivky nízkocyklové únavy materiálu 17246.4 při teplotě materiálu 600 °C
 Křivka 1 : Silové namáhání
 Křivka 2 : Neuberova křivka pro teplotní zatěžování ve vrubech
 Křivka 3 : Čistě teplotní namáhání součásti bez vrubů

Literatura:

- [1] Veselý, S. (2007): *Spalovací komory spalovacích turbin*, ISBN 80-239-6659-X.
- [2] Pospíšil, B. (1971): *Základy neizotermické pevnosti*, Technická publikace KTU-IBZKG, Brno
- [3] Kolár, V., Němec, I., Kanický, V. (1977): *Principy a praxe MKP*, Computer Press 1977

METODIKA STANOVENÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ TURBÍNOVÉHO ROTORU PŘI TERMOMECHANICKÉ ÚNAVĚ

THERMOMECHANICS FATIGUE DAMAGE METHODOLOGY OF THE TURBINE ROTOR

Milan Růžička^{a)}, Josef Jurenka^{a)}, Martin Nesládek^{a)}, Maxim Lutovinov^{a)}, Petr Měšťánek^{b)} a Jan Džugan^{c)}

^{a)} ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6

^{b)} Doosan Škoda Power s.r.o., Tylova 1/57, 301 28 Plzeň,

^{c)} COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany 334 41

Abstrakt

Príspevek se zabývá metodikou výpočtu životnosti a stanovením kritických míst rotoru turbíny při zvýšené četnosti teplých i studených startů a následně postupy vyhodnocování únavového poškození s využitím teorií kombinace nízkocyklové (vysokocyklové) únavy a creepu, zejména potom Sehitoglu modelem a modelem dle Nagodeho. Popisuje potřebné materiálové parametry a schéma programových skriptů a postupu numerických simulací.

This paper describes a fatigue life methodology and determination of critical points of the turbine rotor by increased frequency of both hot and cold operational starts, followed by methods of evaluation of fatigue damage using the combination of low cycle (fatigue) and creep theory, especially the Sehitoglu and the Nagode models. It describes the necessary material parameters and schema of the program scripts and the procedure of numerical simulations.

Úvod

Evropská unie (EU) si dala za cíl podporovat energetické výrobní zdroje produkující nízký obsah uhlíkových zplodin. Priority výzkumných a vývojových iniciativ EU, a zejména programu Horizont 2020, podporují obnovitelné zdroje energie (OZE), inteligentní sítě a další udržitelné hospodářské činnosti (bydlení, doprava, průmysl atd.). Podíl OZE se v energetickém sektoru v Evropě zvýšil z 16,1% v roce 2007 na 23,5% v roce 2012 a očekává se, že v roce 2020 dosáhne 34%. Zatímco podíl výroby energie z vodních zdrojů je stále okolo 10%, podíl energie získaný z větru i slunce se výrazně zvýšil. Jejich podíl se v roce 2007 pohyboval pod 5,0%, ale v roce 2012 dosáhl 6,3% pro sluneční energii a 5,0% pro větrné elektrárny a v roce 2020 se očekává 15,0%, resp. 10,0%. S masivním nasazením OZE v souladu s rostoucí poptávkou po elektřině - zejména v důsledku přechodu na elektrickou energii jako hlavní energie pro dopravu a vytápění - vyvstávají tři hlavní problémy:

- **Stabilita:** Přerušovaná povaha dodávek větrných a zejména solárních zdrojů vede k náhlým změnám zatížení energetických soustav, a tím k ovlivňování stability sítě.
- **Flexibilita:** Výpady dodávek OZE vytvářejí potřebu flexibilních záložních elektráren schopných rychlého náběhu výkonu a s opakovanými cykly provozu.
- **Efektivnost:** Stabilita a flexibilita musí být zohledněna ve spojení s environmentální a ekonomickou efektivitou a se zvýšením životnosti těchto zdrojů.

Existují dvě alternativy, jak řešit přerušované dodávky obnovitelných energií: Buď nalézt metody skladování obnovitelné energie, nebo budovat operativní zdroje, které přemostí nízkou operativnost ve změně výkonu konvenčních elektráren. Tato alternativa předpokládá vyrovnání energetických mezer vyvolaných přerušovanými OZE a to energií vyrobenou konvenčními elektrárnami, tj. stávající infrastrukturou fosilních a jaderných zdrojů energií, případně paroplynovými zdroji. Moderní flexibilní zdroje se vyznačují specifickými

provozními podmínkami. Životnost ovlivňují zejména tzv. studené starty (kde dochází k mechanickým a termomechanickým poškozením), případně teplé starty (kde hrozí vznik nízkocyklové únavy za vysokých teplot). V tomto kontextu partneři, kteří se podílejí na projektu v rámci výzkumného programu EU Horizon 2020 s názvem FLEXTURBINE, navrhli a realizují výzkumný program vývoje upravených a nových fosilních a plynových energetických zdrojů. Tento příspěvek se zaměřuje na cíl výrazně zvýšit počty startů a odstávek, což vyžaduje vývoj metod pro prodlouženého životního cyklu turbín, včetně všech jejích namáhaných komponent.

Termomechanická únava a její poškozovací mechanismy (TMF)

Obor termomechanické únavy materiálu (TMF-Thermo-Mechanical Fatigue) pojednává o poškození způsobeném jak mechanickým, tak teplotním namáháním. Literární zdroje ukázaly, že použití postupů platných pro isothermický výpočet (např. odpovídající maximální teplotě TMF cyklu) může vést i k nekonzervativní predikci, a tedy k potencionální poruše zařízení. Je několik degradačních mechanismů, které se při TMF mohou uplatnit i vzájemně ovlivňovat:

- mechanické poškození,
- creepové poškození a
- oxidační poškození.

V literatuře lze najít celou řadu postupů výpočtů vzorků, dílů a konstrukcí pro režimy TMF. Většina z nich kombinuje mechanickou únavu s creepovým poškozením, případně s oxidací. Velmi často používaným modelem je **Neu-Sehitoglu model** [1], [2], který zohledňuje všechny výše zmíněné typy degradace. Celkové únavové poškození způsobné jedním cyklem degradačních účinků je dáno prostým součtem dílčích poškození všech výše zmíněných vlivů:

$$D = \frac{1}{N} = D_{fat} + D_{ox} + D_{creep} = \frac{1}{N_{fat}} + \frac{1}{N_{ox}} + \frac{1}{N_{creep}} \quad (1)$$

Mechanická únava je zde popisována Manson-Coffinovými křivkami určenými pro pokojovou teplotu (20° C) a účinek teploty zahrnují další uvažovaná poškození.

Oxidační proces je modelován rychlostí růstu oxidů při rozkmitu deformace $\Delta\varepsilon_{mech}$ v závislosti na teplotě a čase. Dosažením kritické tloušťky oxidační vrstvy h_{cr} dochází k jejímu prasknutí a odloupení a další modifikované oxidační degradaci působící na mateřský substrát. Výsledný vztah pro oxidační poškození je ve tvaru

$$D_{ox} = \frac{1}{N_{ox}} = \left[\frac{h_{cr} \delta_0}{B \Phi_{ox} K_p^{eff}} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \frac{2(\Delta\varepsilon_{mech})^{\frac{2}{\beta}+1}}{\dot{\varepsilon}^{1-\frac{a}{\beta}}}, \quad (2)$$

který obsahuje množství parametrů (B , β , a , δ_0 , K_p^{eff}), jež je třeba určit experimentálně. Faktor Φ_{ox} vyjadřuje faktor sfázování. Je maximální $\Phi_{ox} = 1$ pro TMF mimo fázi, a $\Phi_{ox} = 0$, jestliže sfázování nebude mít vliv na oxidační poškození. Oxidace má nejničivější účinek když TMF proces je mimo fázi (maximu teploty odpovídá minimum zatížení a naopak).

Creepové poškození v modelu Neu-Sehitoglu vychází z dutinového modelu tvárného porušování. Růst dutin a trhlin na hranicích zrn je obvykle řízen tahovým zatížením. Creepové poškození je popisováno vztahem:

$$D_{creep} = \Phi_{creep} \int_0^{t_c} A \cdot e^{\frac{-\Delta H}{RT}} \left(\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{eff} + \alpha_2 \cdot \sigma_H}{K} \right)^m dt \quad (3)$$

Rovnice pracuje s napětíovými parametry σ_{eff} efektivního napětí, σ_H hydrostatického napětí a K kinematické zpevnění při creepu (drag stress). Proto je potřeba použít vhodný konstitutivní model materiálu. Parametry α_1 a α_2 určují poměrné množství poškození v tahu či za tlaku, A a m jsou materiálové konstanty, Φ_{creep} pak faktor vlivu rozfázování analogicky jako při oxidaci.

Aby se creep projevil, musí být materiál vystaven kombinaci obou namáhání po jistý čas. Proto soufázové namáhání s rychlejšími změnami stavů nemusí vůbec creepový mechanismus nastartovat. U turbínových rotorů vyvíjených zdrojů se ukázalo, že vlastní mechanismus creepu lze zanedbat, naopak ale mohou být významná teplotní napětí, vznikající při studených startech.

Aplikovatelnost použití Neu-Sehitoglu metody je v praxi limitována potřebou určení velkého množství parametrů: modulu pružnosti a čtyř únavových parametrů, dále až deseti parametrů pro popis oxidačního procesu a šesti parametrů dutinového creepu. K tomu ještě přistupují parametry konstitutivního popisu materiálového chování (např. Druckerův s kombinací izotropního a kinematického zpevnění).

Druhá z popsáných metod TMF popisuje model Nagodeho, viz lit. [3]. Je postaven na myšlence kontinuálního modelování kumulace poškození pomocí modifikovaných hysterezních operátorů. Interpolované ε - N křivky v závislosti na teplotě dodané modelu ve formě vztahu [5], kdy do výpočtu vstupují Manson-Coffinovy křivky s teplotně závislými koeficienty:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ael} + \varepsilon_{apl} = \frac{C_{el}}{E} (2N_f)^b + C_{pl} (2N_f)^c \quad (4)$$

Modul pružnosti E ve vztahu je tzv. dynamický modul pružnosti identifikovaný na základě měření saturovaných hysterezních smyček v polovině životnosti zkušební vzorku. Únavová data jsou nejprve přeočtena pomocí uniaxiálního SWT parametru (Smith-Watson-Topper) na pole diskretních bodů o „souřadnicích“ [PSWT, d_f , T], kde d_f je poškození odpovídající počtu cyklů N_f na dané hladině PSWT a teploty. Vlastní SWT parametr je použit v modifikovaném tvaru

$$P_{SWT}(N_f, T) = \sqrt{E(T) \cdot \varepsilon_a(N_f, T) \cdot (\sigma_a(N_f, T) + \sigma_m(N_f, T))}, \quad (5)$$

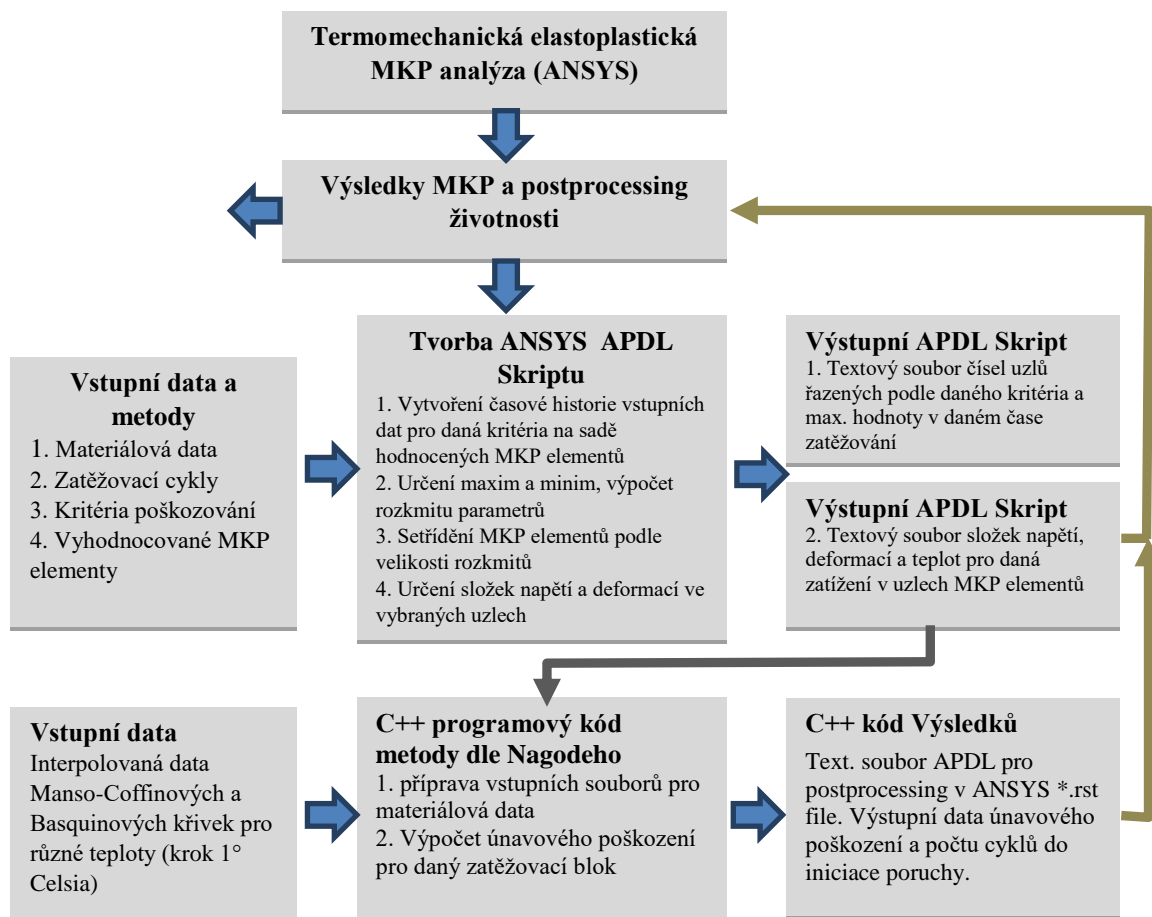
přičemž uvažujeme-li jako vstup ε - N křivky pro střídavý cyklus tah-tlak, je $\sigma_m(N_f, T) = 0$.

Z hlediska lokálního zatížení vyžaduje Nagodeho model jako vstup časovou historii elasto-plastického napětí, deformací a teplot. Tvorba sekvence zatížení a teploty je zajištěna speciálním algoritmem dekompozice amplitud a středních hodnot popsaném detailně v článku [3]. Tento algoritmus zachovává časovou souslednost dekomponovaných amplitud a středních hodnot napětí a deformace spolu s teplotami. To je důležité z hlediska následného výpočtu kumulace poškození v každém časovém okamžiku. Zároveň jsou průběžně počítány hodnoty SWT parametru a následně i poškození. Výhodou tohoto postupu je vysoká efektivnost, neboť finální poškození je spočteno v rámci jediného průchodu programového cyklu přes všechny časové inkrementy. Výpočet poškození je realizován v každém časovém okamžiku ti pomocí hysterezního operátoru (bližší popis viz [4]).

Numerická implementace metod a výpočty MKP

Z důvodů operativnosti výpočtů byl vytvořen MKP model pro predikci životnosti rotoru turbín vycházející z rotačně symetrického (2D) modelu s výpočty časově proměnné elasto-

plastické termomechanické odezvy napětí a deformace. Byly vytvořeny programové skripty pro analýzu únavy, vycházející z výstupů programu ANSYS *.rst. Výsledky výpočtů lze zobrazit v původním MKP modelu a zobrazit tak kritické oblasti na rotoru i mapu výsledných poškození, resp. počtu startů a odstávek do potenciální iniciace únavové trhliny. Výpočtové schéma ukazuje obr. 1. Podrobnější postup a výsledky predikce jsou blíže popsány v příspěvku [6].



Obr. 1 Schéma postupu tvorby programových skriptů pro predikci životnosti rotoru turbíny v podmínkách TMF

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za laskavé podpory grantu No. 653941 v rámci programu Horizont 2020 Evropské Unie.

Literatura

- [1] Sehitoglu, H. (1990): *Thermo-mechanical fatigue life prediction methods. Proc. Conf. Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques*, San Francisco, California, USA, 24 Apr 1990, pp. 47-76.
- [2] Neu, R. W.; Sehitoglu, H.: Thermomechanical fatigue, oxidation and creep: I. Damage mechanisms. *Metall. Trans. A* 1989 20, (9), pp. 1755–1767.
- [3] Nagode, M. (2014) : *Continuous damage parameter calculation under thermo-mechanical random loading. MethodsX 1*, pp. 81-89.
- [4] Nagode, M.; Hack, M.; Fajdiga, M. (2009): *Low cycle thermo-mechanical fatigue: damage operator approach. FFEMS 33*, pp. 149-160.
- [5] Nagode, M.; Hack, M.; Fajdiga, M. (2009): *High cycle thermo-mechanical fatigue: Damage operator approach. FFEMS 32*, pp. 505-514.
- [6] Nesládek, M.; Jurenka, J.; Lutovinov, M.; Růžička, M.; Měšťánek, P.; Džugan, J. (2017): *An assessment of thermo-mechanically induced fatigue damage of a steam turbine shaft. In: 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017*, 19-22 September, Lecco, Italy.

METODA BEZKONTAKTNÍHO OPTICKÉHO MĚŘENÍ DEFORMACÍ - POUŽITÍ PRO ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY V PROSTŘEDÍ

CONTACTLESS OPTICAL METHOD FOR DEFORMATION MEASUREMENT - APPLICATION FOR FATIGUE TESTING IN ENVIRONMENT

Jakub Lacza a Miroslava Ernestová

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Metoda bezkontaktního optického měření deformací, využívající zařízení od společnosti Sobriety s.r.o., se vyznačuje vysokou přesností a jednoduchostí provedení. Samotné měření je prováděno softwarem MercuryRT s modulem Enter, který umožňuje měření v reálném čase a rovněž i vyhodnocení dříve pořízených dat v režimu offline. Mobilní měřicí aparatura, sestávající z kamery, osvětlení a přenosného počítače, umožňuje kromě měření deformací i měření zrychlení a nabízí široké využití v průmyslu, vědě a výzkumu. ÚJV Řež, a. s. používá uvedenou videoextenzometrickou metodu pro stanovení korekce deformace pracovní části zkušební tělesa při testech hodnotících vliv prostředí na únavovou životnost materiálů komponent jaderných elektráren.

Contactless optical measurement method for deformation measurement using equipment from Sobriety s.r.o., is characterized by the high precision and simplicity. The measurement is realized by the software MercuryRT with Enter module, which allows a real-time measurement as well as offline evaluation of earlier obtained data. Mobile measuring equipment, consisting of camera, lighting and portable computer, allows deformation measurement as well as acceleration measurement and offers wide use in industry, science and research. ÚJV Řež, a. s. uses this videoextenzometric method to determine the correction of sample's body deformation for the tests evaluating the influence of the environment on the fatigue life of the materials, used for nuclear power plant components.

Úvod

V rámci mechanického zkoušení materiálů je jedním z měřených parametrů deformace pracovní části zkušební tělesa (ZT). Deformace ZT je na zkušebních zařízeních zpravidla měřena průtahoměry (extenzometry) založených na principu LVDT (linear variable displacement transformer) senzorů. Tyto přístroje se upínají přímo na ZT a ukazují okamžitou deformaci, která vzniká při jeho zatěžování.

Umístěním břitů extenzometrů je vymezena měřená oblast deformace. Nejpresnější je měření vymezující pouze pracovní délku ZT na dřívku vzorku. Nejsou-li břity extenzometrů umístěny na dřívku ZT, měřená hodnota deformace je nepřesná v důsledku měření prodloužení delší oblasti a tuhosti použitého zařízení.

U zkoušek materiálů na vzduchu se extenzometry umísťují na dřík ZT tak, aby vymezovaly pracovní část ZT. Problém ale nastává při zkouškách v prostředí, které se provádí v autoklávech. Konstrukce autoklávu obvykle nedovoluje umístění extenzometru přímo na vzorek.

Testy hodnotící vliv prostředí na únavovou životnost materiálů se provádí v ÚJV Řež v autoklávu s vysokoteplotní vodní smyčkou. Součástí autoklávu jsou externí a interní LVDT extenzometry (Obr. 1). Řídící interní extenzometr (LIN extreme environment displacement transducer) je umístěn uvnitř autoklávu a vyhodnocuje deformaci relativně malé délky zahrnující dřík ZT a jeho uchycení v čelistech. Původní externí extenzometr je umístěn vně autoklávu, vyhodnocuje deformaci z pohybu tažné hřídele, je ovlivňován teplotními změnami

v laboratoři a poskytuje doplňující informaci. Informace o deformaci pracovní části ZT z externího extenzometru je proto méně přesná než z interního extenzometru.

Pro zpřesnění měření deformace pracovní části ZT v prostředí byla použita metoda bezkontaktního optického měření deformace. Cílem bylo vypracování korekční závislosti mezi deformací naměřenou na pracovní části ZT na vzduchu pomocí videoextenzometrické metody a deformací ZT vypočtenou z interního extenzometru. Realizace srovnávacího měření je možná na vzduchu při otevřeném autoklávu, kdy vzorek může být snímán kamerou. Výsledkem tohoto srovnávacího měření je korekční závislost, podle které řídicí software autoklávu zatěžuje vzorek tak, aby na pracovní části ZT bylo dosaženo požadované hodnoty deformace.

Metodika srovnávacího měření

Pro měření bylo použito ZT z materiálu 08Ch18N10T o průměru dířku 5 mm a délce pracovní části 15 mm (v souladu s ASTM E606 a ISO 11782-1). Použitým zkušebním zařízením byl autokláv s vysokoteplotní vodní smyčkou. Zatěžování probíhalo na vzduchu při pokojové teplotě v režimu řízení deformace. Bylo zvoleno symetrické cyklické zatěžování do tahu a do tlaku s rychlostí deformace $0,01 \text{ \%} \cdot \text{s}^{-1}$ a s různými amplitudami deformace ($\epsilon_a = 0,2 - 1,1 \text{ \%}$).

Pro měření deformace bezkontaktní optickou metodou je nevyhnutelná povrchová úprava ZT z důvodu zvýšení kontrastu. Na pracovní část ZT byla nanesena základní vrstva bílé matné barvy ve spreji. Po zaschnutí byly na podklad nastříkány fleky černé matné barvy ve spreji. Tato povrchová úprava nemá vliv na měřenou deformaci. Výsledný vzhled ZT je znázorněn na Obr. 2.

Měření bylo realizováno prostřednictvím měřicí aparatury a softwaru MercuryRT od společnosti Sobriety s.r.o. (Obr. 3) s kamerou měřicí aparatury umístěnou ve vzdálenosti přibližně 15 cm od vzorku a LED osvětlením situovaným nad kamerou v přibližně stejné vzdálenosti od vzorku jako kamera.

V rámci nastavení software MercuryRT byly optimalizovány světelné podmínky snímaného obrazu a zaostření obrazu. Následovalo nastavení souřadnicového systému obrazu pomocí kalibrační destičky a zadání měřítka obrazu. Měřicí body videoextenzometru ohraničovaly pracovní část zkušebního tělesa.

Při měření byly dvěma samostatnými počítači zaznamenávány průběhy řízené deformace z interního extenzometru a deformace snímané kamerou. Pro jednoduché srovnání obou závislostí byl ještě před zahájením měření na obou počítačích seřizen čas. Následně bylo spuštěno cyklování i videoextenzometrické měření.

Výsledky měření

Opakovaná měření prokázala, že v pracovní části ZT nebyla v průběhu zatěžování dosažena požadovaná hodnota deformace. Pracovní část ZT se deformovala až o 50 % méně ve srovnání s řídicím interním extenzometrem, a to při tahovém i tlakovém zatížení. Porovnání průběhů deformace pracovní části ZT měřené kamerou a deformace z řídicího interního extenzometru jednoho z měření je na Obr. 4.

Vyhodnocením průběhů byly získány lineární korekční závislosti, které se použily v řídicím softwaru zatěžovacího počítače. Porovnání průběhů deformace pracovní části ZT měřené kamerou a deformace z řídicího interního extenzometru po úpravě řízení na Obr. 5 ukazuje výrazné zlepšení shody řízené deformace a deformace pracovní části ZT.

Analýzou výsledků se získaly finální korekční konstanty lišící se pro tahové a tlakové fáze, které se aplikují podle požadované úrovně deformace před každým experimentem.

Řízená deformace zkušebního zařízení je počítána jako zjednodušené poměrné prodloužení, které platí pouze pro oblasti malých deformací. Při větších deformacích, kdy se začíná uplatňovat plastická deformace a přestává platit Hookův zákon, je patrný rozdíl mezi tvarem průběhu deformace cyklu. Zatímco průběh deformace z interního extenzometru vykazuje lineární průběh, průběh deformace pracovní části ZT snímáný kamerou je nelineární a vykazuje urychlení deformace s rostoucím podílem plastické deformace. Shoda amplitudy řízené deformace a deformace pracovní části ZT dosahuje $100\pm 2\%$.

Závěr

Bezkontaktní optické měření deformace pomocí softwaru MercuryRT umožnilo zdokumentovat průběh deformace pracovní části ZT. Tyto výsledky byly použity pro stanovení kalibračních konstant pro řízení experimentů na stanovení vlivu prostředí na únavovou životnost v režimu podélné deformace tak, aby požadované hodnoty amplitudy deformace byly na pracovní části ZT zatěžovaného v autoklávu s prostředím dosahovány s maximální přesností.

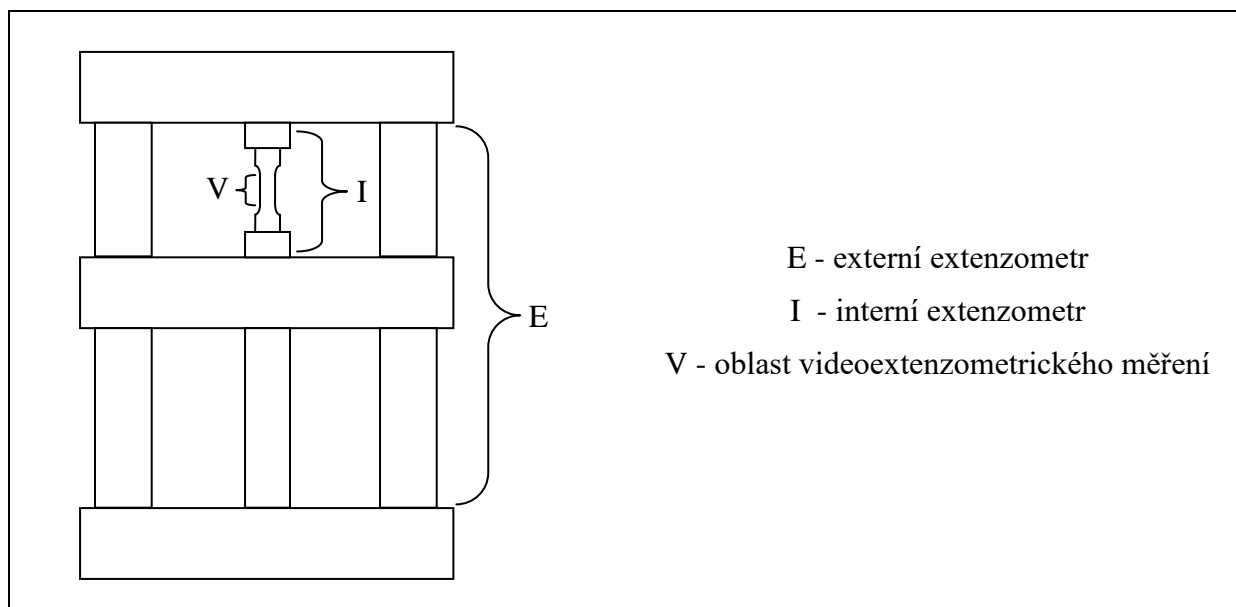
Měření videoextenzometrickou metodou nabízí široké možnosti uplatnění v průmyslu, vědě a výzkumu:

- měření deformace (posunutí, prodloužení) zvolené části měřeného objektu,
- měření zrychlení objektů,
- vizualizace šíření defektu na ZT (na vzduchu),
- hodnocení vibrací (umístění měřících bodů v různých směrech),
- analýzu videozáznamu pořízeného jiným zařízením v režimu offline.

Literatura

- [1] Sobriety s.r.o., *Mercury Real Time Tracking System Mercury RT 2.3.1*, Uživatelský manuál, Revize 1, Kuřim, 2015-02-25.

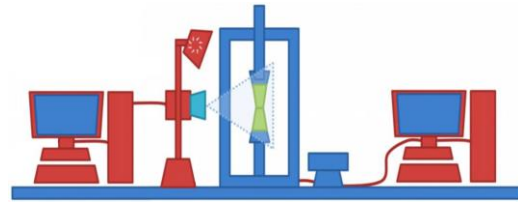
Tabulky a obrázky



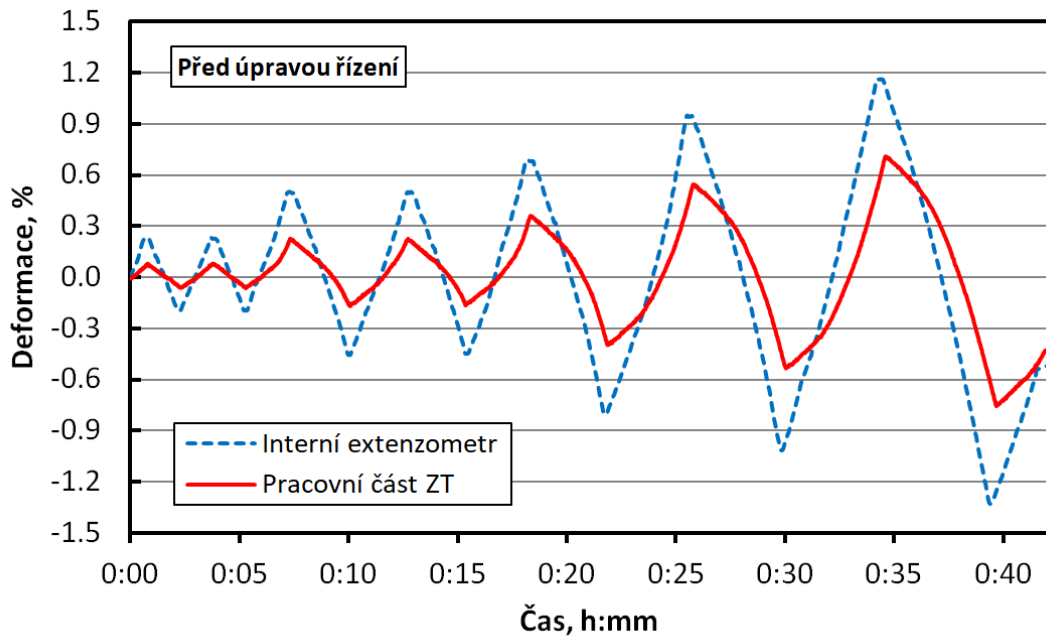
Obr. 1 Schematické znázornění umístění extenzometrů na autoklávu



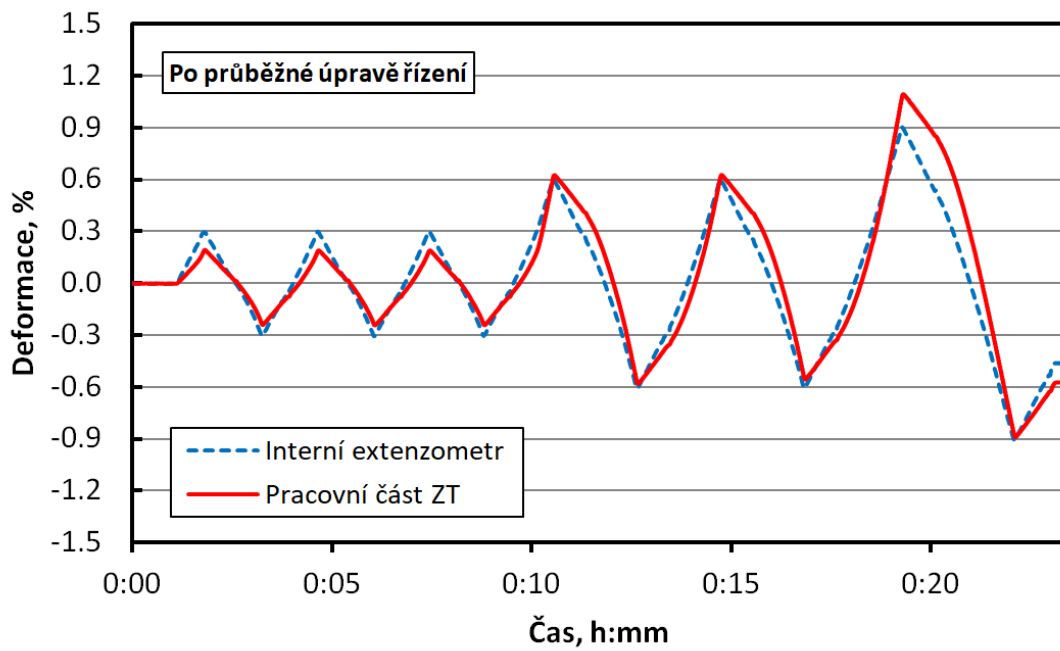
Obr. 2 Povrchová úprava zkušební tělesa



Obr. 3 Schéma měřicího systému [1]



Obr. 4 Srovnání závislostí deformace na čase (před úpravou řízení zkušebního zařízení)



Obr. 5 Srovnání závislostí deformace na čase (po průběžné úpravě řízení zkušebního zařízení)

POSOUZENÍ APLIKACE REGENERAČNÍHO ŽÍHÁNÍ V PROCESU ZAJIŠTĚNÍ DLOUHODOBÉHO PROVOZU VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440

RECOVERY ANNEALING APPLICATION ASSESSMENT IN THE PROCESS OF WWER 440 TYPE REACTOR INTERNALS LONG-TERM OPERATION

Petra Petelová^{a)}, Ondřej Buršík^{a)}, Václav Novák^{a)}, Barbora Marešová^{a)}, Radim Kopřiva^{a)} a Aleš Materna^{b)}

^{a)} ÚJV Řež, a. s.

^{b)} České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Abstrakt

Současný trend prodlužování životnosti komponent jaderných elektráren (JE) na 60 a více let vyžaduje zajištění jejich bezpečnosti a spolehlivosti. Jednou z možností prodloužení životnosti tlakové nádoby reaktoru je její regenerační vyžihání, které je již ověřenou technologií a jehož aplikace do průmyslové praxe byla motivována hlavně nemožností výměny tlakové nádoby. Podobný proces, který by se věnoval i vnitřním částem reaktoru dosud však realizován nebyl. ÚJV Řež, a. s. realizuje v období let 2017 až 2020 výzkumný program, jehož cílem je návrh, vytvoření a certifikace standardního postupu pro obnovení výchozích vlastností materiálů vnitřních částí reaktorů typu VVER-440 metodou regeneračního žihání. Úspěšné řešení tohoto problému přispěje nejen ke zvýšení životnosti JE, ale také současně k podstatnému snížení objemu radioaktivních odpadů, které by vznikly při potřebě výměny poškozených částí novými.

Current trend of long term operation of NPPs for more than 60 years requires assurance of its safety and reliability. One of the possible solutions how to extend service life of RPV is its thermal annealing, which became a verified technology and its application in nuclear industry was prompted mainly due to an inability of RPV exchange. A similar process, which would be focused on reactor internals, has not been realized yet. ÚJV Řež, a. s. is realizing a research program between years 2017 and 2020. The aim of this research is design, development and certification of a standard procedure for restoring the initial properties of VVER 440-type reactor internals by the thermal annealing method. Successful solution of this problem will contribute to long-term operational life of NPPs and lower radioactive waste production.

Úvod

V návaznosti na aktuální ekonomické a politické podmínky je současným celosvětovým trendem v jaderné energetice primárně prodlužování životnosti stávajících elektráren a jejich komponent.

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je klíčovou a nevyměnitelnou komponentou pro funkci jaderné elektrárny a její stav je průběžně monitorován programy svědečných vzorků, na základě kterých se posuzuje míra radiačního poškození strukturních materiálů. Konstrukce TNR a chemické složení materiálů prvních reaktorů typu VVER-440/230 měly výrazný vliv na zvýšenou míru degradace materiálů TNR a proto se již v 70. letech 20. století začala věnovat významná pozornost výzkumu regeneračního žihání TNR. [1] [2]

Vnitřní části reaktoru (VČR) zahrnují komponenty umístěné uvnitř reaktoru, které plní tyto funkce: usměrňují proudění chladiva I. O., tvoří radiační a tepelné stínění a pomáhají definovat geometrii uspořádání aktivní zóny (AZ). Mezi VČR se řadí: šachta a dno šachty reaktoru, blok ochranných trub a koš AZ. Koš AZ je z hlediska radiačního namáhání

nejvýznamnější, jelikož se ze všech VČR nachází nejbližší jadernému palivu, a je tak nejvíce vystaven ionizujícímu záření. Koš AZ slouží k uložení palivových kazet a spolu se šachtou reaktoru tvoří radiační a tepelné stínění tělesa TNR. Koš se dále skládá z nosné desky, válcového pláště, hraněných plechů a 312 šroubů M12, které je upevňují.[3]

Vnitřní části reaktorů nejsou na rozdíl od TNR monitorovány programy svědečných vzorků a stupeň degradace jejich materiálů se tak odhaduje na základě literárních údajů ze zkoušek podobných materiálů, případně z prediktivních vztahů, udávaných v literatuře nebo výpočetních postupech a normách.

Materiály VČR jsou podrobeny silnějšímu ionizujícímu záření než TNR. V případě TNR byla technologie regeneračního žíhání úspěšně aplikována na reaktory typu VVER-440 již v 80. letech a jejich životnost byla tak významně prodloužena.[1][2] Řešení, které by věnovalo pozornost materiálům VČR, nebylo do současnosti realizováno.

Radiační poškození

Radiační poškození je úměrné velikosti fluence rychlých neutronů dopadajících na kovový materiál a projevuje se především vznikem Frankových dislokačních smyček, shluků vakancí a mikroutin, dále shluky intersticiálů a segregací na hranicích zrn. Tyto nepravidelnosti v mikrostruktuře brání pohybu dislokací a tím přispívají ke zvýšení meze kluzu, snížení plasticity a způsobují radiační křehkost (snazší rozvoj trhlin).[4]

U tlakové nádoby reaktoru typu VVER-440/213, vyrobené z feritické oceli 15Ch2MFA, popř. 15Ch2MFAA, je citlivost k radiačnímu poškození způsobena především obsahem fosforu a mědi. K radiačnímu křehnutí mimo jiné přispívá segregace fosforu na hranicích zrn.[4] Jako ochrana TNR před korozi slouží vnitřní austenitický návar.

VČR jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli stabilizované titanem 08Ch18N10T (složení viz Tab. 1). Kromě výše zmíněných degradačních mechanismů dochází u austenitických ocelí ještě k radiačně indukovanému koroznímu praskání pod napětím (IASCC) [5], které nastává při souběžném působení radiace a agresivního chemického prostředí primárního okruhu (demineralizovaná voda s H₃BO₃, KOH a NH₄OH [6]).

Plánované prodlužování životnosti jaderných reaktorů představuje vyšší radiační zátěž materiálů VČR v závislosti na způsobu provozování JE. Zvýšená radiační zátěž vede ke snížení plasticity a zvýšení citlivosti ke koroznímu praskání. K odstranění těchto degradačních jevů se regenerační žíhání jeví jako velmi perspektivní, provozně a finančně méně náročná technologie spojená s příznivými environmentálními dopady.

Regenerační žíhání

Žíhání je procesem, při kterém dochází obecně ke zlepšení mechanických vlastností materiálu. Cílem regeneračního žíhání je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností materiálů.

První regenerační žíhání TNR proběhlo při teplotě 430 °C, což se ukázala být příliš nízká teplota pro dostatečné zotavení materiálu. Následně se osvědčila pro regenerační žíhání TNR teplota 475 °C po dobu min. 100 hodin, kdy dochází k zotavení přibližně z 80 %.[7]

Z literatury je známo, že pro regeneraci struktury žáruvzdorné austenitické oceli nelze použít mechanismu změny krystalové mřížky jako u materiálu TNR, lze ale využít mechanismu difuze chromu a uhlíku. V běžné praxi žíháním austenitické oceli na teplotě 650 až 700 °C po dobu 1000 hod. nastane regenerace struktury. Při žíhání kolem 650 °C ale může dojít ke zcitlivění struktury k mezikrystalové korozi (MKK), které lze eliminovat následným rozpouštěcím žíháním na teplotách 1050 až 1150 °C. Ocel 08Ch18N10T je nicméně stabilizovaná titanem, který snižuje náchylnost k MKK.[8][9]

Na základě těchto informací je nedílnou součástí projektu návrh vhodného způsobu žihání, který by byl aplikovatelný pro materiály VČR a přispěl tak k prodloužení životnosti komponent. Základní omezení spočívají v době žihání a ve velikosti a členitosti komponenty.

Představení projektu

ÚJV Řež, a. s., Divize integrita a technický inženýring zahájila ve spolupráci s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze řešení projektu TA ČR TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“, jehož hlavním cílem je vytvoření certifikovaného postupu pro obnovení výchozích vlastností vysoce ozářeného materiálu VČR typu VVER 440 metodou regeneračního žihání. ÚJV Řež, a. s. zajišťuje dlouhodobě komplexní monitoring stavu TNR i VČR pro projektovou i prodlouženou životnost (až na 80 let) a projekt zabývající se možností regenerace vlastností VČR je tak inovativním rozšířením současných činností přispívající k dalšímu potenciálnímu zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti provozu JE.

Na počátku řešení projektu bude realizován výběr možných vhodných režimů regeneračního žihání pro radiačně poškozený materiál VČR typu VVER 440/213. Specifikace vhodného režimu obnáší mimo jiné vymezení klíčových parametrů jako je teplota a časový průběh. Pro řešení problematiky bude využita fyzikální vlastnost radiací vyvolaných poruch - poruchy při teplotách vyšších, než je teplota ozařování, mohou rychleji difundovat a tím i anihilovat, čímž se radiační poškození snižuje, až prakticky úplně odstraňuje.

Dále budou navrženy typy zkušebních těles a způsob jejich výroby z vybraných komponent VČR. Průběžným výsledkem pak bude zhotovení funkčního vzorku.

Samotná optimalizace režimu regeneračního žihání zkušebních těles z ozářených materiálů VČR bude posuzována měřením tvrdosti, protože měření tvrdosti je efektivní a rychlý způsob charakterizace vlastností materiálů a míry jejich degradace.

V návaznosti na měření tvrdosti budou realizovány další mechanické a mechanicko-korozní zkoušky, pomocí nichž bude hodnoceno zotavení materiálu. Konkrétně budou použity zkoušky tahem, lomové houževnatosti a citlivosti ke vzniku korozního praskání pod napětím. Hodnocení bude doplněno metalografickou a fraktografickou analýzou otestovaných zkušebních těles.

Pro daný projekt disponuje ÚJV Řež a. s. zkušebním zařízením a „polohorkými a horkými“ komorami, určenými ke zkouškám neozářených i ozářených zkušebních těles. Dále má ÚJV Řež, a. s. k dispozici ozářené reprezentativní materiály vnitřních částí reaktoru VVER-440, které jsou vhodné pro realizaci experimentálních činností.

Volba materiálu

Pro řešení projektu byl zvolen materiál VČR z uzavřené jaderné elektrárny VVER-440 Greifswald, která byla 15 let v provozu. Konkrétně se jedná o ozářený materiál z bloku I, čemuž odpovídá i výsledná radiační dávka (viz Tab. 2).

Tab. 1. Chemické složení materiálu 08Ch18N10T (v hm. %) [5]

Materiál	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti	Norma
08Ch18N10T	≤ 0,08	1,0 – 2,0	≤ 0,02	≤ 0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥5C ≤0,6	GOST 5632

Tab. 2. Ozářené materiály zvolené pro řešení projektu

Materiál	08Ch18N10T		
Původ	Greifswald I		
Ozářeno	2.4 dpa	5.2 dpa	11.4 dpa
Komponenta	Nosný válec 36 mm prstenec	Plášť koše aktivní zóny 32 mm prstenec	Hraněný plech 7 mm plát
Výrobce	Izhorskiye Závody		
Výrobní postup	Válcování + tepelná úprava + (svařeno + vertikální svary tepelná úprava/ horizontální svary bez tepelné úpravy)		

Závěr

Vývoj a následná certifikace metodiky regeneračního žihání komponent VČR umožní zajistit výchozí podmínky pro obnovení mechanických vlastností vysoce ozářených materiálů, a tím případně prodloužit životnost důležitých součástí VČR a přispět tak k zajištění dlouhodobého a bezpečného provozu JE.

Samotný vývoj metodiky zahrnuje návrh a ověření optimálního režimu regeneračního žihání materiálů VČR. Certifikace metodiky pak umožní její zavedení do průmyslové praxe.

Projekt TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

Literatura

- [1] *Occupational exposure and reactor pressure vessel annealing*, ISOE European Technical Centre - CEPN Information Sheet No. 12 (1997), (dostupné online na: <http://www.isoe-network.net/publications/pub-resources/pub-info-sheet/etc-information-sheets/198-etc-12/file.html>) (28. 8. 2017),
- [2] Brumovský, M., Ahlstrand, R., Brynda, J., Debarberis, L., Kohopaa, J., Kryukov, A., Server, W. (2008): *Annealing and re-embrittlement of RPV materials*, State of the art report, ATHENA WP-4, AMES Report N. 19. JRC 46534, EUR 23449 EN,
- [3] Heřmanský, B. (1981): *Jaderné reaktory*, Praha: SNTL,
- [4] Chatterjee, S., Kotak Shah, P. (2002): *WWER pressure vessel steel embrittlement: an overview*, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India,
- [5] Petrequin, P., Pelli, R., Soulat, P.; Tavassoli, A. A. (1997): *General Review of Reactor Vessel Internals: Pressurised Water Reactors, including WWER*, Effect of Irradiation on Water Reactors Internals Volume 1, Luxembourg, European Commission,
- [6] Štamberg K., Silber R. (2007): *Chemie provozu jaderných elektráren* (Učební texty - přepracované vydání), Praha (dostupné online na: http://www.jaderna-chemie.cz/data/documents/vyuka/stamberg/CHPJE_2015_text.pdf) (28.8.2017)
- [7] Pelli, R., Törrönen, K., (1995): *State-of-the-art review on thermal annealing*, European Network on Ageing Materials Evaluation and Studies, Espoo,
- [8] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3,
- [9] Barták, J. (2008): *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*, Praha: Dashöfer, ISSN 1803-2834.

VYSOKOTEPLTNÍ KOROZE V OXYFUEL UHELNÝCH KOTLÍCH

HIGH TEMPERATURE CORROSION IN OXYFUEL COAL-FIRED BOILERS

Josef Cizner, Jan Hruška a Jakub Mlnářik

SVÚM a.s.

Abstrakt

Energetika se výrazně podílí na emisích CO₂ spalováním fosilních paliv. Existuje řada způsobů eliminace CO₂, nadějnou technologií pro průmyslovou aplikaci je metoda Oxyfuel. Při této metodě se pro spalování místo vzduchu používá směs kyslíku a CO₂ a na výstupu obsahují spaliny především CO₂ a vodní páru. Z materiálového hlediska dochází na teplosměnných plochách kotlů kromě oxidace k dalšímu degradačnímu mechanismu - nahličování. V příspěvku jsou uvedeny výsledky laboratorních korozních zkoušek vybraných materiálů, které dokumentují mechanismus vzniku korozních vrstev s vysokým obsahem uhlíku i pouze oxidických.

Energy contributes significantly to CO₂ emissions from burning fossil fuels. There are numerous ways to eliminate CO₂, promising technology for industrial applications is a method Oxyfuel. In this method, instead of air for combustion is used a mixture of oxygen and CO₂ and at the outlet flue gas contains mainly CO₂ and water steam. From the material point of view on heat transfer surfaces of boilers occurs not only oxidation but also further degradation mechanism - carburization. The paper presents the results of laboratory corrosion tests of candidate materials demonstrating the mechanism of corrosion layers formation with high carbon content and only oxide layers.

Úvod

Pro snižování obsahu CO₂ v ovzduší bude důležité se zaměřit na procesy výroby elektrické energie.

Jednou z cest je zavádění CCT (clean coal technologie), s návaznými technologiemi na odstraňování CO₂ ze spalin a jeho bezpečné ukládání.

Technologie separace oxidu uhličitého ze spalin jsou v současnosti následující:

1. pre-combustion postupy – odstraňování CO₂ z paliva. Většinu paliv je třeba transformovat až na vodík a CO₂, což komplikuje technologická zařízení a zvyšuje investiční náklady
2. post-combustion postupy – odstraňování CO₂ ze spalin, vzniklých klasickým spalováním
3. postup Oxyfuel – provádí se spalováním paliva směsí kyslíku a CO₂, spaliny obsahují jako dominantní složku CO₂ a dále vodní páru. Není potřeba separace CO₂, po předchozí odloučení vody se provádí jeho zkapalňování. Tato technologie má velkou naději pro průmyslovou aplikaci

Popis procesu Oxyfuel

V tomto procesu se spaluje uhlí nikoliv s použitím vzduchu, nýbrž plynu, který obsahuje cca 25 % kyslíku a zbytek CO₂. Spaliny se odsířují klasickou vápencovou metodou (polosuchou nebo mokrou vypírkou), po odsíření se odstraní zkondenzovaná pára a následuje kondenzace oxidu uhličitého po kompresi na cca 100 bar. Výhodou celého procesu je vznik minimálního množství oxidů dusíku a snadné odstranění CO₂.

Celý proces je náročný energeticky – zařízení pro získávání čistého kyslíku, technologie zkapalňování oxidu uhličitého, technologie dopravy a skladování. Přesto je tento

technologický postup nejméně ekonomicky náročný. Provozní zkušenosti jsou již získávány na řadě pilotních zařízení.

Pro proces Oxyfuel se nabízí uplatnění v moderních uhelných kotlech s podkritickými i nadkritickými parametry páry. U nadkritických kotlů jsou obvyklé parametry páry zatím na úrovni 600 °C, 300 barů, ovšem plánuje se zvyšování teploty páry až na 700 °C a 350-370 barů. Při těchto zvýšených parametrech nebudou již v současnosti intenzivně studované modifikované konstrukční oceli použitelné.

V rozvinutých státech byla navržena řada různě modifikovaných materiálů i materiály zcela nové. Tyto materiály musí splňovat požadavky konstruktérů na pevnostní vlastnosti zatepla a rovněž odolnost proti vysokoteplotní korozi za přítomnosti minoritního obsahu SO₂. Při zavedení procesu Oxyfuel se projeví nauhličující účinek atmosféry s dominantním podílem CO₂.

Speciálně pro kotle s nadkritickými parametry páry byla navržena řada různě modifikovaných i zcela nových materiálů, jejich použití zejména u nízkolegovaných a střednělegovaných ocelí je i pro moderní podkritické kotle. Tyto materiály jsou nadále zkoušeny pro získání spolehlivých informací o jejich chování za vysokých teplot a tlaků při předpokládané dlouhé životnosti teplosměnných ploch (až 200 000 hodin). Jelikož podle posledních poznatků lze výsledky laboratorních testů extrapolovat max. o jeden řád, měly by i tyto zkoušky být dlouhodobé. Creepové zkoušky probíhají dlouhodobě, zkoušky vysokoteplotní koroze v laboratorních podmínkách trvají max. 5 000 hodin. Lze je však doplnit dlouhodobými zkouškami přímo v provozu, které trvají a jsou pravidelně vyhodnocovány během několika let. Většina literárních údajů k této problematice se týká pouze velmi krátkých časů experimentů, rovněž zkoušené materiály jsou redukovány většinou na střednělegované feritické oceli. Kromě těchto základních materiálových údajů je nutno získat znalosti i o technologickém chování kovových materiálů – tvařitelnosti, svařitelnosti, ohybatelnosti v závislosti na tepelných režimech. V případě změny spalovacího procesu – Oxyfuel, je nutno tyto rozsáhlé zkoušky zopakovat v nauhličujícím prostředí. Kromě oxidace za vysokých teplot (vliv i SO₂ z uhlí) se projeví vliv uhlíku. V závislosti na teplotě se mění termodynamická aktivita uhlíku (s rostoucí teplotou klesá) a naopak se zvyšuje jeho difúzní rychlost. Na povrchu kovové matrice tak mohou vznikat karbidické částice a snižuje se podíl legur, tvořících oxidy v základním materiálu. Na povrchu vzniká méně kvalitní oxidická vrstva s nižší ochrannou funkcí, na rozhraní mezi korozní vrstvou a matricí vzniká karbidická podvrstva.

V současnosti nejsou k dispozici solidní výsledky dlouhodobých korozních testů, kdy se může vliv nauhličujícího prostředí výrazněji projevit. Lze se oprávněně domnívat, že řada materiálů, vhodná pro části moderních kotlů při spalování za přítomnosti vzduchu (s vysokým podílem dusíku) bude v případě zavedení procesu Oxyfuel nepoužitelná. Ovlivněna bude i svařitelnost ocelí a slitin – homogenní i heterogenní svary při nutných opravách kotlů při odstávkách.

Experimentální část

Pro naše laboratorní zkoušky byly dle předchozích výběrů zvoleny následující oceli a slitiny.

Teplota zkoušení	550 °C – oceli T23, T92, VM12, Super 304H
	650 °C – oceli VM12, Super 304H, SAN 25
	750 °C – oceli Super 304H, SAN25, niklová slitina HR230

Tento příspěvek je věnován právě teplotě 750 °C, výsledky obou nižších teplot byl publikovány na této konferenci v roce 2016. Chemické složení zkoušených materiálů je v tab. 1. Expoziční testy byly provedeny na pěti vzorcích od každého zkoušeného materiálu

a pro každou teplotu. Vzorky o rozměrech 8x30 mm byly uloženy v korundových lodičkách do plynotěsných pecí, kam byla pomocí hmotnostních elektronických regulátorů dávkovaná modelová atmosféra. Složení atmosféry: 50 vol% H₂O + 40 vol% CO₂ + 5 vol% O₂ + 1,1 vol% SO₂ + 0,9 vol% N₂

Časová expozice vzorků byly 300, 700, 2000 a 3 500 hodin, po těchto časech byly vzorky gravimetricky hodnoceny.

Výsledky zkoušek

Gravimetrické hodnocení

Výsledky zkoušek jsou na obr. 1. Porovnání zkoušek v modelové atmosféře Oxyfuel a na vzduchu je na obr. 2, ze kterého je patrna při přepočtu přírůstků hmotnosti na korozní rychlost mm/rok výrazně vyšší korozní rychlost v nauhličujícím prostředí.

Metalografické hodnocení

Při expozici v prostředí Oxyfuel probíhají paralelně dva mechanismy-oxidace a nauhličování. U nízkolegovaných ocelí vzniká na rozhraní oxidická vrstva-základní materiál mezivrstva s vysokým obsahem Fe₃C. Při vyšších obsazích Cr (nad 9 %Cr) vzniká v této mezivrstvě karbid typu M₂₃C₆ s vysokým podílem Cr. Chrom potom chybí při oxidaci pro vznik korozní vrstvy, vznikají tak méně kvalitní oxidické vrstvy (Fe, Cr)₂O₃.

Metalograficky je morfologie vzniklých vrstev dokumentována na obr. 3,4 a 5. Oxidická vrstva i vrstva s vyšším uhlíkem byly nalezeny především u méně korozně odolné oceli S304H. Výše legované oceli se jeví jako korozně odolnější nauhličování.

Mikroanalýza korozních vrstev

Pro mikroanalýzu byl použit mikro analyzátor CAMEBAX od fy CAMECA. Byla prováděna bodová analýza po bodech, vzdálených navzájem 200 μm přes obě vrstvy až do základního materiálu. Kvantitativní hodnoty vybraných prvků – Fe, Cr, C a O pro ocel S304H ukazují cca 6hm% uhlíku v mezivrstvě.

U výše legovaných materiálů je korozní vrstva velmi tenká nebo zcela chybí. Je zde však výrazná penetrace uhlíku do základního materiálu. Při analýze penetrovaných hranic u oceli SAN 25 byl naměřen obsah uhlíku 0,6 až 0,8 hm%, dále cca 10 hm% O₂ a cca 35 hm% Cr.

Závěr

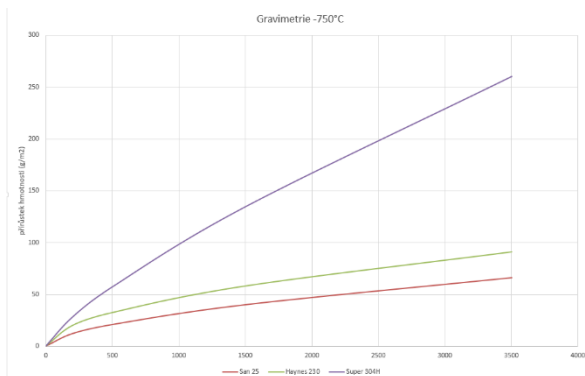
Z provedených experimentů je zřejmé, že v nauhličujícím prostředí Oxyfuel dochází k významnému nauhličování oceli a ke vzniku mezivrstvy se zvýšeným obsahem uhlíku. Mechanismem celého procesu nauhličování i oxidace je počáteční penetrace po hranicích zrn. Celkové přírůstky hmotnosti jsou v nauhličujícím prostředí výrazně vyšší proti pouhé oxidaci na vzduchu. Při konstrukci energetických kotlů podkritických i nadkritických je třeba s vlivem zvýšené korozní rychlosti na životnost trubkových systému počítat.

Tento projekt TA 04020118 je realizován za finanční podpory Technologické agentury.

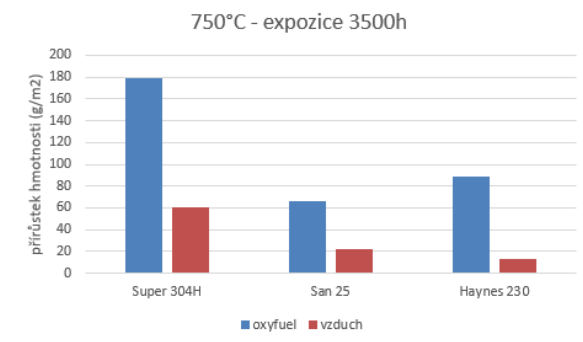
Tabulky a obrázky

Tabulka 1 Chemické složení použitých ocelí a slitin

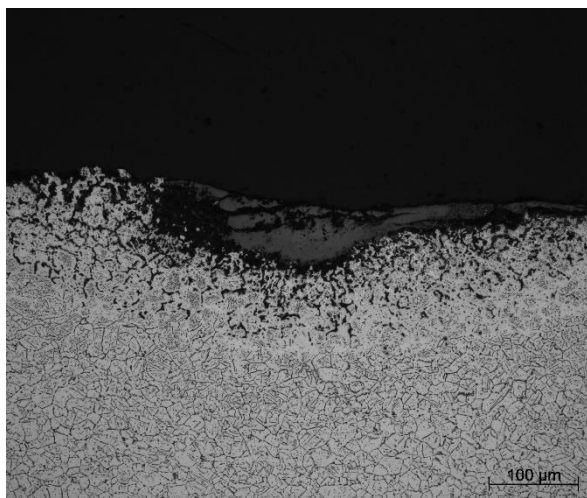
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Ni	Co	Cu	Nb	N	Al	Fe
Super 304H	0,088	0,26	0,87	0,024	0,005	18,23	0,29			8,76		3,11	0,53			zbytek
SAN25	0,076	0,23	0,49	0,014	0,002	21,50	0,22		3,08	25,53	1,50	2,96	0,55	0,38		zbytek
HR230	0,095	0,44	0,59	0,027	0,005	21,47	1,26		12,43	zbytek	0,259				0,32	1,96



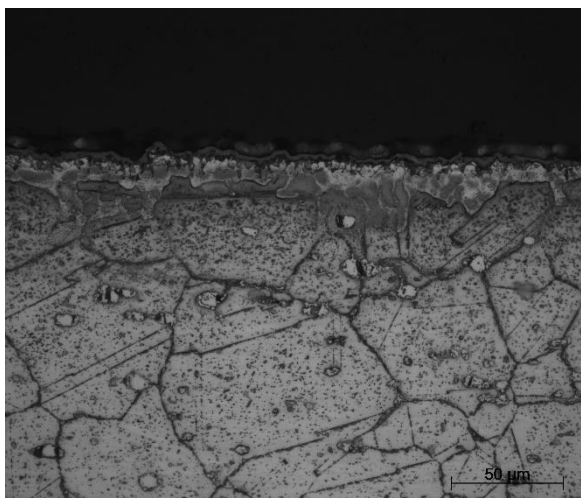
Obr. 1



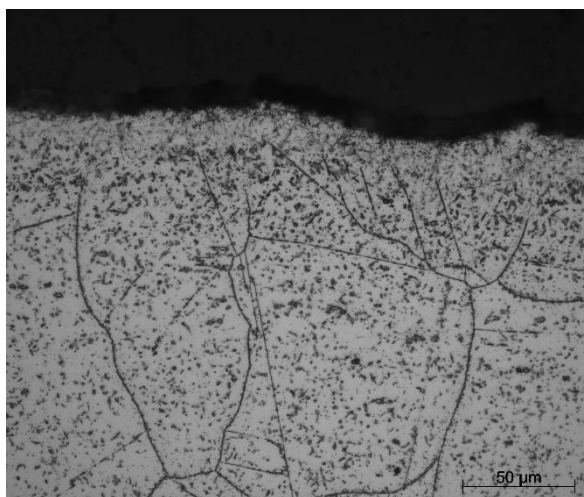
Obr. 2



Obr. 3 S304H-750°C/3500 h, penetrace do ZM



Obr. 4 HR-230-750°C/3500 h, korozní vrstva



Obr. 5 SAN25-750°C/3500 h, penetrace do ZM

Literatura

- [1] Cizner J., Hruška J: *Materiálové řešení moderních kotlů při separaci oxidu uhličitého metodou Oxyfuel*, Průběžná zpráva SVÚM a.s.
- [2] Tab. 1 *Kontrolní analýzy zajištěných materiálů na kvantometru SPEKTROMAXx*

ROZBOR KOROZNÍHO NAPADENÍ LOPAT KAPLANOVY TURBÍNY MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

THE ANALYSIS OF CORROSION ATTACK OF BLADES OF SMALL WATER POWER STATION

Josef Kasl^{a)}, Jakub Horník^{b)}, Jana Pecharová^{a)}, Miroslava Matějová^{a)}, Stanislav Krum^{b)} a Petr Zuna^{b)}

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

^{b)} ČVUT v Praze, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2

Abstrakt

Príspevok obsahuje výsledky materiálového rozboru lopatek oběžného kola Kaplanovy turbíny na malé vodní elektrárně. Analyzováno bylo prvkové složení materiálu, jeho mechanické vlastnosti, mikrostruktura a morfologie povrchových korozních důlků. Dále bylo stanoveno složení úsad a korozních produktů. K povrchovému poškození všech tří lopat došlo lokální korozi za vzniku korozních důlků o velikosti až několika milimetrů. Příspěvek podává výsledky těchto rozborů a je v něm diskutován vliv původního stavu dílů na korozní napadení.

The contribution contains results of material analysis of rotating blades of Kaplan turbine of small water power station. Analyses of chemical composition, mechanical properties, and microstructure of blade material were performed. In addition composition of corrosion products was measured. Pitting corrosion of blade surface was found on all blades; the maximum size of corrosion dimples reached values of several millimetres. The key cause of corrosion attack is discussed on the basis of obtained results.

Úvod

Na malé vodní jezové elektrárně na Labi jsou provozovány dvě turbíny TG1 vyrobené v roce 2013. Výkon každé turbíny je 3582 kW, průměr oběžného kola 5,1 m. Elektrárna byla uvedena do provozu v září 2014. Při následujících inspekcích mokrých částí turbíny bylo zjištěno lokální korozní napadení lopat oběžných kol. Tyto skutečnosti vyvolaly reklamační řízení. Lopatky oběžného kola byly vyrobeny z materiálu GX4CrNi13-4 mod [1]. Modifikace prvkového složení spočívala ve změnách v obsazích prvků Cr (13,0 – 13,5 hm. %), Mo (0,6 – 0,7 hm. %) a N (0,02 – 0,03 hm. %). Tepelné zpracování odlitků bylo následující: austenitizace na teplotě 1020 °C/12h/vzduch (ochlazování 31 hod) a žihání 600 °C/12hod/pec (ochlazování 23,5 hod. rychlostí 21 °C/hod).

První analýzy byly provedeny přímo na elektrárně a spočívaly v nedestruktivní analýze buď přímo na celých lopatkách (chemické složení materiálu lopatek přenosným analyzátozem, mikrostruktura lopatek metodou, složení úsad přenosným analyzátozem) a v odběru velmi malých vzorků zpracovaných v laboratoři. Příspěvek popisuje zejména výsledky zkoušek provedených na vzorcích vyrobených z relativně velkých objemů materiálu odebraného z oběžných lopat turbín.

Cílem práce bylo a) potvrdit/nebo vyvrátit splnění předepsaných vlastností materiálu deklarovaných výrobcem; b) stanovení mechanismu korozního napadení.

Sledované vzorky a použité metody

Na elektrárně byl proveden odběr celkem čtyř vzorků ze všech tří lopat turbíny č. 2. Vzorky byly odvrtny při intenzivním chlazením ostříkovaním (doba odvrátání činila 20 – 30 minut). Takto odebrané vzorky byly válcovitého tvaru o průměru cca 14 mm a rozdílné délce v závislosti na poloze (různá tloušťka stěny a orientace povrchů). Po dokumentaci

vzorků byly vzorky prohlédnuty pomocí stereolupy (SL) a řádkovacího elektronového mikroskopu (ŘEM). Pozornost byla zaměřena na stranu vzorku, která pocházela ze strany Pressure side (PS) lopaty. Na této straně byly totiž cíleně vybírány oblasti korozního poškození. Na povrchu byl dokumentován vzhled korozních produktů a úsad a bylo stanoveno jejich prvkové složení pomocí metody ED mikroanalýzy. Pozornost byla rovněž věnována korozním důlkům. Následně byly korozní zplodiny umyty a znovu sledovány pomocí SL a ŘEM. Jeden ze vzorků byl použit na stanovení mechanických parametrů materiálu turbíny. Z důvodu omezeného množství odebraného materiálu nebylo možné vyrobit zkušební tělesa standardní velikosti, a byla proto vyrobena dvě miniaturní zkušební tělesa o průměru dřívku 2 mm a celkové délce 20 mm. Zbývající tři zkušební tělesa pak byla podélně rozříznuta. Rovina řezu byla orientována tak, že byla „rovnoběžná“ s podélnou osou turbíny a leží v tangenciálním směru. Jedna sada „polovin“ vzorků byla použita pro stanovení prvkového složení metodou optické emisní spektrometrie (OES). U každého vzorku byla provedena tři měření, a to na straně PS, uprostřed vzorku a na straně suction side (SS). U druhé sady „polovin“ vzorků byly na řezech zhotoveny metalografické výbrusy. Ty byly použity ke sledování mikrostruktury materiálu pomocí BL a světelného mikroskopu (SM). Na výbrusech byla rovněž měřena mikrotvrdość HV0,5.

Výsledky

Prvkové složení materiálu

Složení bylo stanovováno postupně mobilním spektrometrem DELTA CLASSIC, metodou PMI a metodami ED a WD mikroanalýzy na velmi malém vzorku odebraném z lopatky [2] a metodou OES [3]. Omezíme-li se na obsahy pouze Cr a Mo, byly získané výsledky pro „malé“ vzorky a on line měření následující (vše udáno v hm. %):

DELTA CLASSIC	Cr – 13,2	Mo – 0,5
PMI	Cr – 12,2 až 13,6	Mo – 0,46 – 0,53
ED mikroanalýza	Cr – 13,4	Mo – 0,5
WD mikroanalýza	Cr – 12,9	Mo – 0,83

Rozbor pomocí OES byl proveden vždy na třech místech na vzorku reprezentujícím celou tloušťku stěny lopatky – při obou stěnách a „uprostřed“ tloušťky stěny lopatky. Analýza je integrální v tom smyslu, že výsledek je získán z „plochy“ asi 10 mm². Výsledky analýzy ukazují, že složení vzorků se v tloušťce všech tří lopat prakticky nemění a u lopat č. 1 a č. 3 je prakticky totožné. U vzorku z lopaty č. 2 byl ve srovnání se zbývajícími lopatami zjištěn vyšší obsah C, Mn, P, S, Cu a Ni a naopak nižší obsah Mo. Prvkové složení všech tří analyzovaných vzorků odpovídá hodnotám uvedeným v materiálovém předpisu pro ocel G-X4CrNi13-4 (1.4317). Pokud provedeme srovnání s hodnotami deklarovanými dodavatelem pro modifikovaný materiál, lopata č. 2 nespĺňuje předepsanou dolní hranici pro obsah Mo (změřený obsah 0,48 – 0,50 hm. %, předepsaný obsah min. 0,60 hm. %).

Mechanické vlastnosti materiálu

Mechanické vlastnosti byly měřeny (z důvodu velikosti odebraného vzorku) na dvou miniaturních zkušebních tělesech (vyrobených z materiálu z lopaty 3) tahovou zkouškou při pokojové teplotě. Zjištěná mez kluzu (652, 677 MPa), mez pevnosti (804, 809 MPa) a tažnost (16,1; 16,6 %) vyhovují u obou vzorků předepsaným hodnotám (min 550 MPa; min 760 MPa; min 15 %). Tažnost je však těsně nad povoleným limitem. Při zkoušce došlo k lomu těles transkrystalickým tvárným porušením, tedy očekávaným mechanismem. Překvapující poněkud bylo to, že ačkoliv jedna lomová plocha přecházela přes část řediny, ve výsledcích mechanických parametrů se to však výrazněji neprojevílo.

Mikrotvrdości měřené přes šířku stěny lopatky byly u všech tří lopatek obdobné na úrovni 280 HV 0,5 (odpovídá hodnotám tvrdości 27 HRC resp. 266 HB) a nebyly ani zjištěny žádné

výrazné změny v jejich průběhu přes šířku stěny. Tvrdost není v předpisech výrobce ani v normě specifikována.

Struktura materiálu

Ve struktuře materiálu se v celém objemu vyskytují drobné řediny a jejich shluky, což je ovšem v litém materiálu očekávatelné. Jednotlivé řediny dosahují velikosti až několika desetin milimetru. V materiálu bylo také přítomno relativně velké množství oxidických globulárních vměstků s typickou velikostí několika desítek, výjimečně až stovek mikrometrů.

Mikrostruktura materiálu je tvořena směsí martenzitu a δ -feritu. Částice δ -feritu mají (na řezu) většinou výrazně protáhlý tvar, často orientovaný směrem ke stěnám lopaty. V trojrozměrném pohledu se jedná jak o částice stěžňovitého, tak i deskovitého dosti členitého tvaru. Tato mikrostruktura je očekávaná vzhledem k chemické konstituci materiálu a její poloze v Schäfflerově diagramu. Množství δ -feritu (stanovované na řezech) bylo u jednotlivých lopatek 1,3 (lopata 2), 1,8 (lopata 3) a 2,0 (lopata 1) procent plošného podílu. ED mikroanalýza ukázala, že existují výrazné rozdíly v obsazích chrómu a molybdenu v martenzitické matici a v částicích δ -feritu. Změřený obsah chrómu v matici byl na úrovni 13 hm. %, zatímco v δ -feritu činil 17 hm. %. U molybdenu bylo obohacení částic δ -feritu ještě výraznější na úrovni 100 % - 0,7 hm. % v matici a 1,5 hm. % v částicích δ -feritu.

Korozní napadení

U všech tří vzorků bylo na straně PS pozorováno selektivní korozní napadení, které se projevovalo přítomností korozních izolovaných důlků a jejich skupin v různé fázi vývoje. Na straně SS korozní důlky nebyly přítomny, neboť zatímco na straně PS byly cíleně zaměřeny, na straně SS nebyly z tohoto pohledu náhodným výběrem „zasazeny“.

Charakter všech důlků na všech třech sledovaných vzorcích je obdobný. Důlky vznikly, nebo se případně rozvíjely z původních defektů, selektivním korozním napadením. Tomu výrazněji odolávaly částice δ -feritu díky svému zvýšenému obsahu chrómu a molybdenu. V korozních důlcích tak tyto částice vytvářejí výběžky do „volného“ prostoru, které často vytvářejí bizarní útvary a propletence. Povrchová struktura zkorodované martenzitické matrice (pokud není překryta korozními produkty) odráží mikrostrukturu této strukturní složky. Korozní napadení napadá hranice martenzitických jehlic/paketů a často jsou tím uvolněny částice kovu, které se mohou zachytit společně s korozními zplodinami a úsadami v povrchových krustách a objemnějších výplních korozních důlků.

Korozní napadení je na povrchu v různém stupni vývoje – převažující část povrchu je bez zjevné koroze, jsou přítomné nehluboké mělké jamky, ale i složitější systémy důlků a kanálků o rozměrech (laterálních i hloubkových) přesahujících 1 mm.

Selektivní napadení nerezavějících martenzitických ocelí je vyvoláno lokálním narušením povrchové pasivační vrstvy. Vedle vlastností materiálu a okolního (korozního prostředí) je významným faktorem případného korozního procesu stav povrchové vrstvy. V optimálním stavu by měl být povrch co nejhladší (vyleštěný). U sledovaných vzorků se povrch jevil jako dosti narušený brusnými rýhami (odhlédneme-li od hrubých škrábanců, které zřejmě vznikly při odběru vzorků).

V materiálu všech tří lopat byly nalézány necelistvosti metalurgického původu – póry a řediny. Uvážíme-li jejich množství, které bylo nalezeno při rozborech (v malém objemu materiálu dodaných vzorků ve srovnání s celkovým objemem lopat), je vysoce pravděpodobné, že některé ústily na opracovaný povrch lopat. Tyto povrchové defekty byly iniciátory rozvoje korozních důlků tím, že vytvářely polouzavřené prostředí, ve kterém postupně narůstala koncentrace škodlivých látek vyvolávajících korozi. Vliv chemické heterogenity na hranicích mezi martenzitem a částicemi δ -feritu (v místech, kde toto rozhraní ústí na povrch lopatky) je nejasné.

V korozních produktech a úsadách převládají oxidy železa a chrómu. Množství vápníku je menší (v průměru 2,7 hm. %), množství manganu výrazně kolísá - od 0 do 15,6 hm. %. Hmota obsahuje v menším množství sodík, hořčík, hliník, křemík, fosfor, síra, chlór, draslík a titan. Ojedinele detekovány i kobalt a měď.

Závěry

Vlastnosti materiálu lopat

a) Chemické složení lopaty č. 2 nesplňuje předepsanou dolní hranici pro obsah Mo (změřený obsah 0,48 – 0,50 hm. %, předepsaný obsah min. 0,60 hm. %) deklarovanou výrobcem pro modifikovanou ocel G-X4CrNi13-4 (1.4317).

b) Mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti a tažnost) vyhovují předpisu. Zjištěná tažnost je však těsně nad povoleným limitem.

c) Struktura materiálu. Materiál ve sledovaném objemu obsahuje izolované řediny i jejich shluky o velikosti od několika desetin do jednoho milimetru. Z hlediska mikročistoty materiál obsahuje relativně velký počet globulitických vměstků o velikosti do několika desetin milimetru. Mikrostruktura materiálu je (podle očekávání) tvořena směsí martenzitu a δ -feritu (od 1,3 do 2,0 objemových procent). Jeho částice byly oproti martenzitické matici výrazně obohaceny o chróm (o 30 %) a molybden (o 114 %).

Korozní napadení povrchu lopat

Korozní degradace materiálu je vždy dána spolupůsobením nejméně tří faktorů: vlastnostmi okolního korozi vyvolávajícího prostředí – v této práci není sledováno, objemovými vlastnostmi materiálu příslušného dílu (chemické a fázové složení, reálná struktura, mikročistota, mikrostruktura atd.) a stavem povrchu dílu. Z hlediska korozního napadení sledovaných lopat je možné z materiálového hlediska konstatovat:

d) U všech tří vzorků bylo na straně PS pozorováno selektivní korozní napadení. Korozní napadení je na přítomno na povrchu v různém stupni vývoje – převažující část povrchu je bez zjevné koroze; místně jsou však přítomné jamky, ale i složitější systémy důlků a kanálků o rozměrech (laterálních i hloubkových) přesahujících 1 mm.

f) Na základě rozborů odebraných vzorků lze důvodně předpokládat, že jedním z klíčových materiálových faktorů byla přítomnost dutin metalurgického původu – pórů a ředin na povrchu obrobené lopaty. Tyto povrchové defekty byly iniciátory rozvoje korozních důlků tím, že vytvářely polouzavřené prostředí, ve kterém postupně narůstala koncentrace škodlivých látek vyvolávajících korozi.

g) Dalšími negativními faktory, které mohly přispět k iniciaci a rozvoji koroze povrchu lopat, jsou mikro-heterogenita v prvkovém složení (obsahy pro korozi rozhodujících prvků chróm a molybden) jednotlivých strukturních složek a fází (martenzit a δ -ferit) a stav povrchu lopat po přebroušení.

Literatura

- [1] Standard DIN EN 10283:1998 *Corrosion resistant steel castings*. Standard DIN EN 10283:1998 Corrosion resistant steel castings.
- [2] Horník, J., Krum, S.: *Analýza korozního poškození turbínových lopatek MVE Štětí*, technická zpráva 16-10-091, FS ČVUT Praha, 12.10.2016.
- [3] Kasl, J., Pecharová, J., Novák, M., Matějová, M.: *Materiálový rozbor vzorků z korozně poškozených oběžných lopatek Kaplanovy turbíny 2 z el. MVE Štětí*. Výzkumná zpráva VYZ-VZ/58/017/032, VZÚ Plzeň, Plzeň 15.06.2017.

AKTIVNÍ SNÍŽENÍ ROZSAHU EROZNÍCH ÚČINKŮ NA PONOŘENÉ TEPLOSMĚNNÉ PLOŠE FLUIDNÍHO KOTLE - VÝVOJ A PROVOZNÍ NASAZENÍ

ACTIVE REDUCING EXTEND OF EROSION ON THE IMMERSSED HEAT EXCHANGE SURFACE IN FLUIDIZED BOILER – DEVELOPMENT AND REAL OPERATION.

Jan Andreovský a Petr Mareš

United Energy a.s., Teplárenská 2, Most Komořany, 434 03

Abstrakt

Príspevek shrnuje zkušenosti a výsledky z vývoje a reálného provozu opatření, které aktivním způsobem snižuje rozsah eroze na ponořené teplosměnné ploše fluidního kotle teplárny United Energy a.s.

The paper collected experiences and results from development and real operation equipment that reduced the erosion on the immersed heat exchange surface by active way. The equipment is developed and used in fluidized boiler power plant United Energy a.s.

Úvod

Teplárna Komořany společnosti United Energy a.s. provozuje 8 fluidních kotlů. Nominální parametry kotle jsou 154 t/h resp. 138 t/h páry při přetlaku 7.5 MPa a teplotě 490 °C. Jedná se o parní kotel s tzv. stacionární (bublinkovou) fluidní vrstvou ve spalovací komoře. Průřez spalovací komory kotle je cca 80 m², distribuce fluidizačního média je zajištěna talířovými tryskami s částečnou perforací. Kotel je navržen a realizován s ponořenou teplosměnnou plochou ve fluidní vrstvě, která slouží jako výparník nuceného cirkulačního okruhu kotle. Ponořením nebo odkrytím plochy výparníku, tj. zvýšením nebo snížením výšky fluidní vrstvy, je regulován výkon kotle. Výparník je koncipovaný jakou trubkový, přičemž na vnější straně výměníku je fluidní vrstva spalovací komory a uvnitř trubek proudí parovodní směs. Ve spalovací komoře každého kotle je instalováno 9 svazků (věží) na přední straně kotle a 9 svazků (věží) na zadní straně kotle. Pro svazek se používá výraz ložový had, neboť svým tvarem připomínají tělo hada. Jeden svazek je sestaven z přímých úseků trubek a kolen v celkové délce cca 61 m. Celkově je v loži instalováno cca 1.1 km délky trubek což odpovídá cca 308 m² otápené plochy. Nominální výchozí tloušťka stěny trubky a kolene ložového hadu je 12.5 mm, vnější průměr trubky ložového hadu je 88.9 mm, použitý materiál je 13CrMo44 (ekvivalent ČSN 15 021). Pohled do fluidního lože s ložovými hady je zobrazen na obr 1.

Kotel je provozován s odsířením ve fluidní vrstvě a dále s reinjektáží úletového popílku. Reinjektáž popílku je zaváděna zejména z důvodů zvýšení efektivity odsíření a dosažení nominálních parametrů kotle ve vybraných provozních oblastech kotle. Odsíření je zajištěno dávkováním drceného vápence do spodních partií fluidní vrstvy (tzv. pod vrstvu). Dodávka vápence a reinjektovaného popílku pod vrstvu je zajištěna nízkotlakou pseudopravou prostřednictvím inketážních trysek ponořených ve fluidním loži.

Fluidní vrstva lože spalovací komory o provozní teplotě cca 790 – 850 °C je tvořena směsí produktů po spalování a odsíření, paliva a spalin. Dominantní prvky chemické skladby ložové vrstvy vyjádřené v oxidické formě jsou SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O, CaO, CaSO₄ a další. Obecně se jedná o tvrdý materiál, který má vysokou abrazivní a erozivní schopnost. Ložový materiál je ve fluidním stavu v neustálém pohybu a interakcí s okolím způsobuje erozivní úbytek okolního prostředí. Ve spalovací komoře tedy dochází k erozivnímu úbytku fluidních trysek, vyzdívek kotle a zejména ložových hadů. Na ložových hadech jsou exponovány erozí spodní řady a kolena. Ložové hady napadeny erozí jsou zobrazeny na obr. 2. Z výchozí tloušťky

12.5 mm stěny dojde v některých místech ložových hadů k úbytku na tloušťku k úrovni až 5 mm. Tloušťka stěny je pravidelně kontrolována v případě podkročení přípustné tloušťky je realizována úseková výměna ložových hadů, většinou 1. a 2. exponovaná řada všech 18 svazků. Z pohledu údržby se jedná o relativně složitou a nákladnou akci a tedy případné snížení rychlosti erozního úbytku materiálů je přínosné jak z pohledu ušetřených údržbových nákladů v rámci životnosti kotle, tak z pohledu zvýšení ročního provozního vytížení kotle.

Analýza problematiky eroze ve fluidní vrstvě.

V roce 2015 byl zjištěn relativně rychlý úbytek tloušťky stěny ložového hadu od nasazení do provozu. Původním referenčním měřítkem byl pouhý čas od nasazení nových ložových hadů do doby podkročení přípustné tloušťky. Byly uskutečněny dílčí rozborů pro potvrzení shodné jakosti použitých materiálů v průběhu provozu kotle a následně byla zpětně analyzována zátěž spalovací komory z pohledu průchodu materiálu. V období od nasazení r. 2009 do 2015 došlo k navýšení zátěže tuhými zbytky po spalování z průměrných 8.6 t/h kotel na 12.1t/h což je navýšení o 40%. Toto zjištění odpovídalo trendu zkrácení životnosti resp. zvýšení erozního úbytku ložových hadů a zároveň je i v souladu podle viz [1] s fyzikálním popisem faktorů ovlivňující erozní úbytek W_0 .

$$W_0 = \frac{M \cdot v^n \cdot \cos^2 \alpha}{6\varphi y} \quad (1)$$

kde

- M [kg] je celková hmota dopadlých částic
- v [m.s-1] je dopadová rychlost
- n [1] je empirický (materiálový) exponent, pro kovy 2.05 – 2.43
- α [°] je úhel nárazu
- φ [1] je poměr mezi délkou a hloubkou rýh
- y [N] je horizontální složka síly mezi částicí a erodovaným materiálem

Při fyzické obhlídce erozního opotřebení byla zjištěna významná nerovnoměrnost úbytku ložových hadů na jednotlivých svazcích. Některé svazky nebo části svazků byly s nepatrným úbytkem a naopak jiné svazky měly vysoké úbytky jak plošné tak lokální. Byl vysloven předpoklad, že fluidního pole spalovací komory vykazuje nerovnoměrnosti pravděpodobně v oblasti rychlostí a bylo přistoupeno k matematicko – fyzikálnímu modelování poměrů ve fluidním loži. Byl vytvořen model prostoru spalovací komory se svazky, stěnami spalovací komory, dnem lože se vstupem fluidizačního média a ponořenými injektážními tryskami. Pro výpočtový model prostoru spalovací komory byly nastaveny vstupní a okrajové podmínky. Výpočet byl uvažován jako stacionární.

Simulací prostoru lože spalovací komory bylo zjištěno, že příčina nerovnoměrnosti a vysokých lokálních úbytků materiálů je způsobena provozem ponořených injektážních trysek viz obr. 3. Injektážní trysky zajišťují vysoký hmotový přísun materiálu do lože pomocí pseudopravy. V případě zastavení dodávky materiálu proudí přes trysky trvale dopravní médium, které slouží jako chlazení. Prostřednictvím provozu injektážních trysek dominují v loži dva efekty zvyšující erozi na ložových hadech:

- Výtoková rychlost materiálu a dopravního vzduchu do lože několikanásobně převyšuje rychlost fluidizace a proud urychleného materiálu z injektážních trysek dopadá na exponované teplosměnné plochy, kde zvyšuje erozní úbytek.

- V případě, že je odstavena dodávka materiálu do lože, proudí přes trysky vysokou rychlostí vzduch. Výtoková rychlost vzduchu výrazně převyšuje rychlost fluidizace a proud vytékajícího vzduchu do lože deformuje proudění v loži směrem k teplosměnným plochám. Teplosměnné plochy jsou tak opětovně účinkem výtokové rychlosti proudu vzduchu vystaveny zvýšené expozici erozí.

Závěry zjištění simulace byly následně verifikovány se skutečností. Dosažená shoda reality a simulace se pohybuje na úrovni cca 70% - 80% v daném případě byla považována za dostatečnou pro další postup prací.

Aktivní snížení erozních účinků na ponořené teplosměnné ploše.

Na základě zjištěných příčin bylo přistoupeno k hledání řešení snížení erozních účinků. Pozornost byla zaměřena zejména na aktivní snížení eroze tedy účinné ovlivnění samotných příčin. Přestože podstata minimalizace příčin je zřejmá, reálný způsob provedení se potýká s protichůdnými požadavky na chod technologie. Výsledné řešení tak musí být kompromisním řešením z několika úhlů pohledu. Aktivní opatření musí snížit:

- Plochu zasaženou erozí
- Množství materiálu dopadající na teplosměnnou plochu
- Účinek výtokové rychlosti

Při hledání optimálního řešení bylo simulováno a hodnoceno několik variant v rámci optimalizační úlohy. Přehled řešených a optimalizovaných variant je uveden níže a v tabulce č 1. Mimo vlivu do rychlostních poměrů spalovací komory bylo opatření hodnoceno z pohledu složitosti a citlivosti technického provedení a empirických zkušeností z provozu.

Hodnocené a optimalizované varianty:

- Revize počtu trysek – spočívá v porovnání resp. hmotové bilanci skutečného provozu a provozovaného zařízení.
- Zahnutí a prodloužení injektážních trysek – trysky jsou prodlouženy směrem do středu lože a zahnuty o cca 30° - 40° ve směru příčné cirkulace lože.
- Zahnutí a zkrácení injektážních trysek – trysky jsou zkráceny cca do poloviny délky ložových hadů a zahnuty o cca 30° - 40° ve směru příčné cirkulace lože.
- Prodloužení a zahnutí trysek směrem nahoru – trysky jsou prodlouženy směrem do středu lože a pod úrovní konce ložových hadů zahnuty o cca 30° - 40° ve směru toku spalin.
- Injektážní trysky zůstávají svými rozměry a na výtok je instalován deflektor proudu. Je řešeno několik variant tvaru deflektoru a optimalizována poloha deflektoru. Výtokový proud a materiál naráží do překážky po výtoku z injektážní trysky.
 - Plochý deflektor – řešena i optimální vzdálenost od výtoku.
 - Prstencový deflektor
 - Kuželový deflektor

Výsledná použitá varianta byla zvolena revize počtu trysek a zbylých 8 injektážních trysek bylo osazeno plochým deflektorem. Vyrobená sestava 8 deflektorů byla nasazena do testovacího provozu jednoho kotle.

Provozní nasazení

Ploché deflektory jsou trvale nasazeny od 10/2015 a jejich provozní expozice se pohybuje v oblasti cca 9800 provozních hodin. Úbytek ložových hadů (LH) je hodnocen v závislosti na tuhých zbytcích po spalování (TZS), které prošly fluidním ložem. Původní provoz bez deflektorů vykazoval:

- Průměrný měrný úbytek **78 kt_{TZS}/1mm_{LH}**
- cca 56% exponovaných kolen vykazuje úbytek materiálu vyšší než 40% původní tloušťky (průchod 390kt_{TZS})

Provoz s plochými deflektory vykazuje:

- Průměrný měrný úbytek **218 kt_{TZS}/1mm_{LH}**
- Cca 49% kolen je označeno jako kolena se zvýšenou erozí s tím, že erozní opotřebení probíhá ve zpomaleném trendu, tzn. úbytek o cca 64% nižší oproti stavu bez deflektorů (průchod 98 kt_{TZS})
- Existují lokální místa (cca 1- 3 místa v loži), kde dochází k opotřebení původním trendem.

Přestože byl kladen důraz na jednoduché řešení, dochází při provozu s deflektory k jejich vlastní poruše. Tento stav byl primárně způsoben časovým omezením a kompromisní volbou materiálu pro testovací provoz. Poruchy nejsou způsobeny konstrukčním řešením ale spíše výběrem materiálu deflektorů a stavem nosných injektážních trysek. Materiál deflektorů (17 255) pracuje ve fluidním loži při teplotě 790 – 850 a jeho mechanické vlastnosti jsou již pro tento provoz nedostatečné.

Závěr

V teplárně United Energy a.s. byl uskutečněn vývoj a provozní nasazení opatření, které aktivně snižuje erozivní účinky fluidního lože na ponořené teplosměnné ploše. Vývoj řešení byl směřován do identifikace příčin a následného návrhu optimálního řešení. Jako optimální řešení byl zvolen plochý deflektor před ústím trysky, který vytváří umělou překážku proudu injektovaného materiálu a pseudopravního vzduchu do lože. Instalací deflektoru dojde ke sražení injektovaného materiálu do prostoru lože a ke snížení rychlosti v proudu dopravního vzduchu. Řešení a rozměry jsou navrženy optimálně tak, aby byla zachována funkčnost injektážních trysek a zároveň byla snížena erozní zátěž ponořené teplosměnné plochy. Řešení je provozně nasazeno v režimu testování na jednom kotli. Během 2 letého provozu kotle s instalovaným opatřením bylo dosaženo poklesu erozního úbytku o cca 64%. Trvalé „průmyslové“ řešení se předpokládá s využitím materiálu s vyšší teplotní odolností.

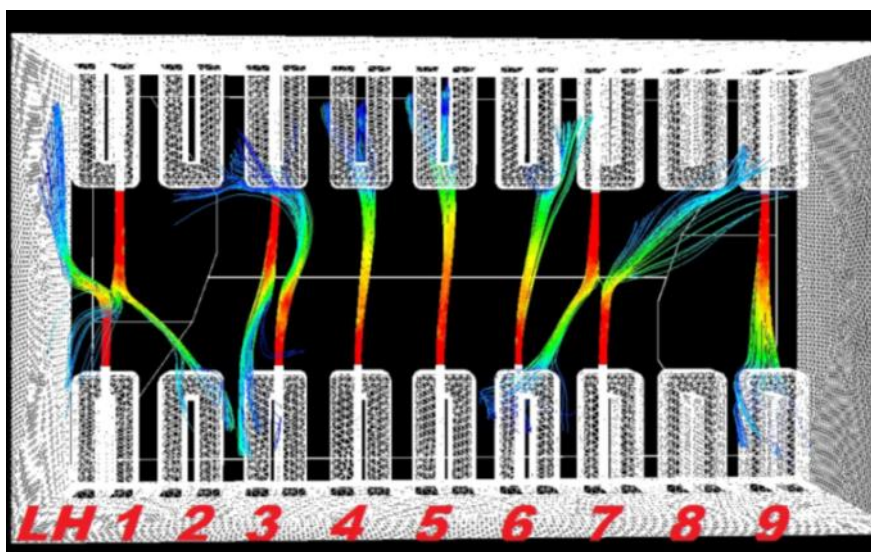
Tabulky a obrázky



Obr.1 Pohled do spalovací komory odstaveného kotle



Obr. 2 Erozní opotřebení ložových hadů.



Obr. 3 Simulace prostoru lože se zvýrazněním proudnic injektážních trysek.

Tab.1 Přehled variant a jejich nasazení

Varianta	Ovlivnění rychlostních poměrů	Technická proveditelnost a citlivost	Použití – výsledek
Revize počtu nutných trysek	Příznivé – zánik výtokového proudu	Jednoduché	2 z 10 injektážních trysek zrušeny.
Zahnutí a prodloužení trysek	Změna – snížen počet kontaktních míst ale zároveň je přesun do jiných míst s vyšší intenzitou	Jednoduché	Nepoužito
Zahnutí a zkrácení trysek	Změna – snížen rozsah eroze na protilehlých plochách a zvýšena eroze na přiléhajících (blízkých).	Jednoduché	Nepoužito
Prodloužení a zahnutí trysek směrem nahoru	Příznivé – minimalizace ploch	Jednoduché	Nepoužito – výrazné zkrácení doby zdržení materiálu v loži
Plochý deflektor	Příznivé – snížení zasažených ploch a dopadové rychlosti	Jednoduché	Použito
Prstencový deflektor	Příznivé – snížení zasažených ploch a dopadové rychlosti	Jednoduché, ale citlivé na optimální nastavení	Nepoužito
Kuželový deflektor	Příznivé – snížení zasažených ploch a dopadové rychlosti	Jednoduché ale citlivé na optimální nastavení	Nepoužito

Literatura

- [1] Andreovský, J., Mareš, P. (2016): *Provozní zkušenosti s opatřeními proti abrazi a erozi instalovaných na technologii v United Energy a.s.*, Sborník z 11. Konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Místo vydání: Západočeská univerzita v Plzni – Vydavatelství
- [2] Andreovský, J., Mareš, P. Rajlich, D. (2016): *Zařízení pro snižování erozivních účinků fluidní vrstvy na ponořené teplosměnné ploše stacionárního fluidního kotle*, Užité vzor 29626. Místo vydání: Praha

HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE PARNÍCH GENERÁTORŮ JE TYPU VVER 1000 MW ZHOTOVENÉ PŘÍDAVNÝM SVAŘOVACÍM MATERIÁLEM TYPU SV-10CH16N25AM6

Petr Ducháček, Marek Palán a Zdeněk Čančura

Řízení zvláštních procesů a technické kvality, Řízení techniky JE, ČEZ, a. s., JE Temelín,
373 03 Temelín
petr.duchacek@cez.cz, marek.palan@cez.cz, zdenek.cancura@cez.cz

Abstrakt

Příspěvek pojednává o analýze degradačních mechanismů působících na heterogenní svarové spoje zhotovené přídatným svařovacím materiálem ruského typu Sv-10Ch16N25AM6 a projevu jednotlivých identifikovaných degradačních mechanismů. Dotčené heterogenní svarové spoje typu N s nechráněným přechodem mezi austenitickým (08Ch18N10T) a feritickým (22K) materiálem se nacházejí především na sekundární straně parního generátoru JE typu VVER 1000 MW. Dalším cílem je popsat možná opatření vedoucí k potlačení působení degradačních mechanismů za účelem prodloužení životnosti svarových spojů a s nimi souvisejících komponent.

The article focuses on the Analysis of Degradation Mechanisms impacting the heterogeneous welds, which are made of the additional welding material type Sv-10Ch16N25AM6 and on the demonstration of the particular identified degradation mechanisms. The heterogeneous welding joints type N, with the unprotected transition between the austenitic (08Ch18N10T) and ferritic (22K) material, are mostly located on the secondary side of the steam generator type VVER 1000 MW. The second target of the paper is to describe the possible measures which leads to the suppression the impacting degradation mechanisms in order to the extension the welding joints lifetime period and related components.

Úvod

Energetická zařízení patří mezi nejnáročnější technologické celky ve strojírenství, a to především z hlediska jejich projekce, konstrukce, technologie zpracování, výroby a provozu. Znalost a porozumění degradačních mechanismů materiálů a jejich svarových spojů je důležité pro rozvoj metod hodnocení zbytkové životnosti těchto technologických celků.

U náročných konstrukcí, které jsou zhotoveny z řady různých materiálů, je nutné řešit jejich napojení. Existuje mnoho konstrukčních způsobů, jak tento problém řešit, ale zatím nejběžnějším způsobem je svařování. V klasických energetických provozech patří k rizikovým například spoje mezi parovodním potrubím, přehříváky a napojení výstupu membránových stěn (kotlové trubky) [1]. U jaderných elektráren patří mezi rizikové tzv. připojovací svary jednotlivých komponent, zde se často nevyhneme spojení dvou chemicky rozdílných materiálů (rozdílných bází) a tím tedy vzniklého heterogenního svarového spoje (HSS). Vzniklé heterogenní svary pak bývají nejsledovanějšími místy.

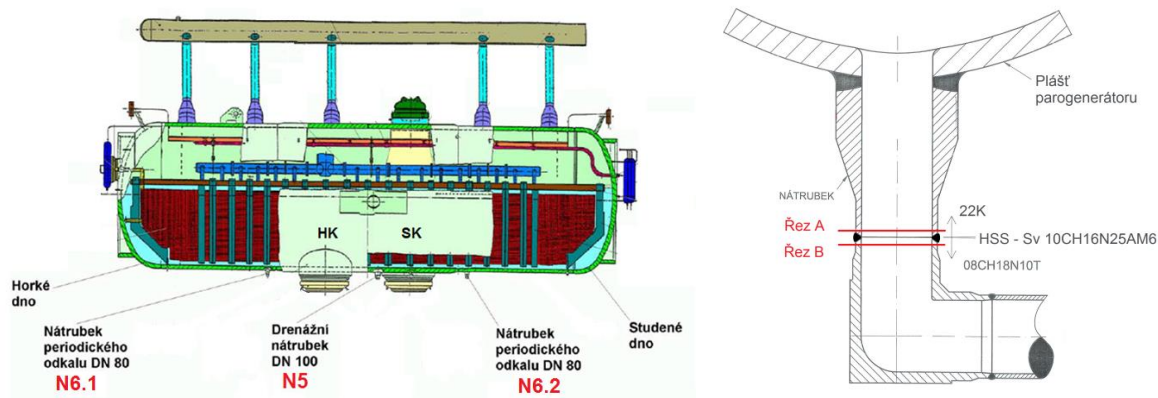
Svařování je komplexní a rozsáhlá činnost, která vyžaduje ty nejvyšší požadavky na jakost, a to především na jaderných elektrárnách.

Heterogenní svarový spoj 22K - Sv-10Ch16N25AM6 - 08CH18N10T

Jakostní uhlíková ocel 22K (ekvivalentní značení dle DIN 20Mn5) je feriticko-perlitická ocel, ze které je vyrobena tlaková nádoba parogenerátoru, dále se také používá pro tlakovou nádobu kompenzátoru objemu.

Heterogenní svarový spoj, o kterém článek pojednává, se nachází na systému RY – periodický odkal, nátrubek N6 (N6.1 - horké dno, N6.2 – studené dno) a drenáže

parogenerátoru, nátrubek N5 (viz obr. 1). Tyto připojení slouží k vodochemickému režimu sekundárního okruhu parogenerátoru a k jeho vypouštění. Periodický odkal se používá k opakovanému odvodu pevných částic a koncentrací solí ze spodní části parogenerátoru. Odvod tohoto média z parogenerátoru se realizuje systémem potrubí z austenitické oceli 08Ch18N10T [2].



Obr. 1 Parogenerátor s dispozičním znázorněním nátrubků N5, N6.1, N6.2 (vlevo) a konstrukční uspořádání HSS (vpravo) [2]

Spojení těchto dvou rozdílných ocelí bylo realizováno přechodovým přídavným materiálem Sv-10Ch16N25AM6. Porovnání předepsaného rozsahu chemického složení ocelí a přídavného materiálu je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Předepsané a naměřené chemické složení ocelí a přídavného materiálu [3]

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Cu	V	Co
Nátrubek 22K	Specifikace materiálu	0,19	0,20	0,75	max.	max.	max.	0,30	0,10	max.	-	max.	0,02	-
	parogenerátoru SM1000/80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Naměřeno	0,26	0,45	1,05	0,030	0,030	0,030	0,50	0,15	0,050	-	0,030	0,05	-
Svar 10CH16N25AM6	Specifikace materiálu	0,05	max.	0,80	max.	max.	14,50	23,00	5,00	-	-	-	-	-
	parogenerátoru SM1000/80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Naměřeno	0,12	0,70	2,00	0,030	0,020	17,00	27,00	7,50	-	-	-	-	-
	Naměřeno	0,106	0,437	1,584	0,016	0,012	14,27	21,35	3,984	0,038	0,011	0,068	0,057	0,023
Tvarovka 08Ch18N10T	Specifikace materiálu	max.	max.	max.	max.	max.	17,00	9,00	-	5xC	-	max.	-	max.
	parogenerátoru SM1000/80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Naměřeno	0,08	0,80	2,00	0,035	0,020	19,00	11,00	-	0,70	-	0,30	-	0,05
	Naměřeno	0,08	0,49	1,38	0,3	0,013	17,5	9,65	-	0,52	-	0,08	-	0,028

Vliv promíšení přídavného materiálu se základními materiály

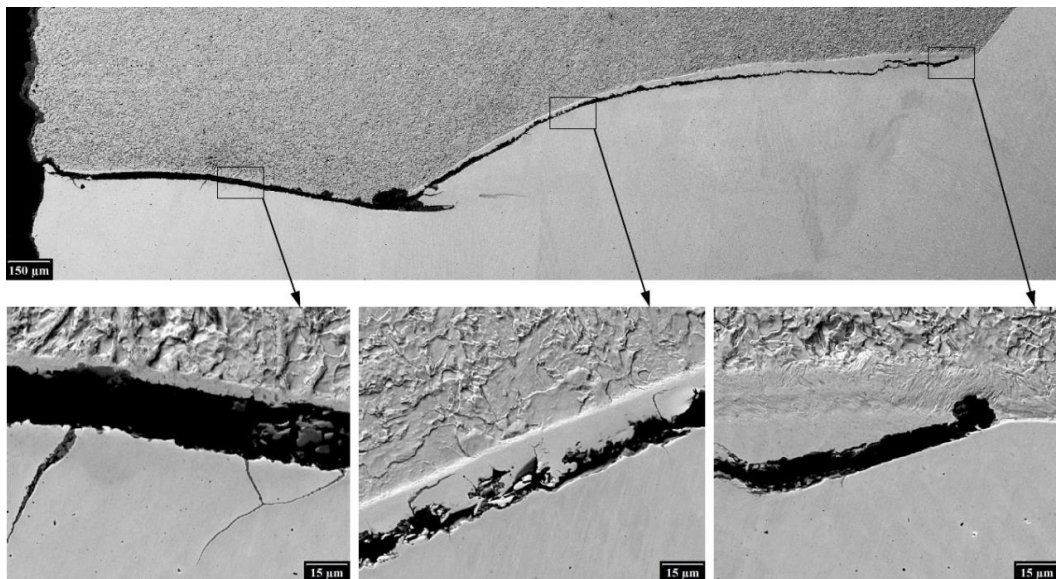
Vyjmuté HSS (viz Obr. 1. – místo odběru) byly v rámci experimentálního programu zkoumány pro nalezení kořenové příčiny porušení. Pro přesnou lokalizaci a velikost jednotlivých vad byla využita CT-tomografie. Po přesném zmapování vad byly HSS podrobeny metalografickému rozboru s využitím světelné i elektronové mikroskopie. Následně byla riziková místa doplněna o liniovou chemickou analýzu a o průběh mikrotvrdosti.

Metalografické posouzení

Na obrázku č. 2 je detail trhliny, která se šířila převážně ve svarovém kovu v blízkosti linie ztavení oceli 22K - svarový kov Sv-10Ch16N25AM6.

Vzhledem k tomu, že na lících trhliny nebyly nalezeny striace ani postupové čáry, byl únavový mechanismus vyloučen.

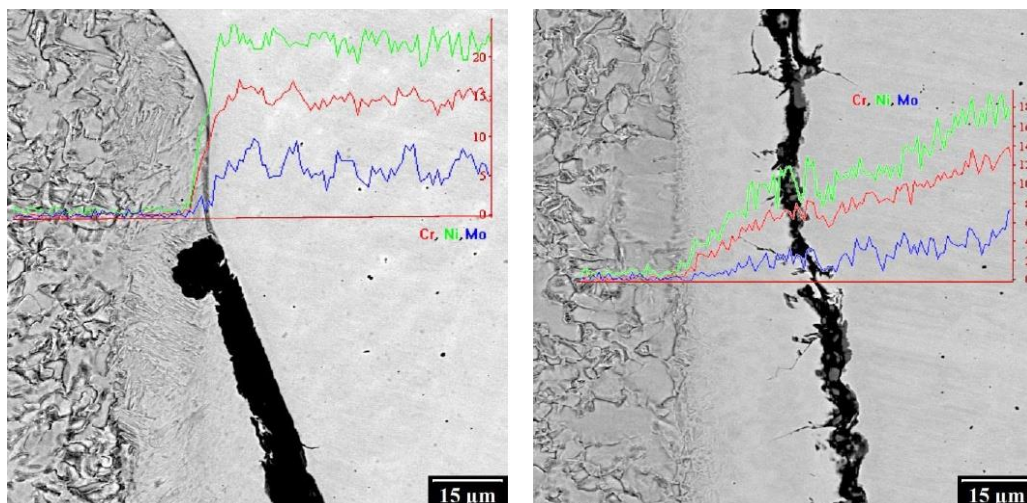
V materiálu svarového kovu docházelo podél magistralní trhliny k častému vzniku sekundárních interkrystalických trhlin. V blízkosti ústí trhliny byly na vnitřním povrchu nátrubku z materiálu 22K korozní důlky.



Obr. 2 Trhlina šířící se převážně ve svarovém kovu v blízkosti linie ztavení [4]

Analýza chemického složení

Pomocí EDS liniové analýzy bylo na výbrusech prokázáno (viz obr. 3), že změny mikrostruktury svarového kovu směrem od rozhraní se základním materiálem jsou provázány poměrně výraznými změnami obsahu hlavních legujících prvků. Z výsledku je patrné, že při procesu tvorby svarového spoje lokálně docházelo k různě rychlému ztuhnutí svarového kovu, čemuž pak odpovídá i gradient obsahu legujících prvků.



Obr. 3 Změny obsahu hlavních legujících prvků (hm. % Cr, Ni a Mo) v okolí trhliny u rozhraní mezi základním materiálem 22K a svarovým kovem [4].

Možná opatření pro další provoz bloku s HSS

Vzhledem k velkému rozsahu experimentálního rozboru HSS jsou uvedeny níže některé doporučení pro nápravná opatření [5].

Zkušenosti z Ruska ukazují, že i při sebelepším provedení HSS (kvalifikovaný technologický postup, kvalifikovaní svářeči, kvalifikované kontroly během jeho zhotovení), při použití stávajícího přídavného drátu typu Cr16Ni25Mo6 s vyšším obsahem niklu a nižším obsahem chromu, dojde vždy k poškození svaru. Z tohoto důvodu je doporučeno přejít na jiný typ přídavného drátu s vyšším obsahem chromu a nižším obsahem niklu [5].

Pokud se bude nadále používat drát typu Cr16Ni25Mo6, musí být kořen HSS zavařen jiným drátem s vyšší korozní odolností nebo kořen svaru musí být ošetřen jinou technologickou úpravou vnitřního povrchu. Svarový spoj vytvořený přídavným materiálem typu Cr16Ni25Mo6 by neměl být ve styku s provozním médiem [5].

Dlouhodobě je nutné věnovat pozornost heterogenním svarovým spojům, kde je návar nebo svar proveden přídavným materiálem Sv-10CH16N25AM a je ve styku s provozním médiem. Jedná se o HSS typu N a NK. Na základě zpracování podmínek jejich expozice a konstrukčního provedení svarového spoje, je nutné posoudit míru rizikovosti jejich dalšího provozu podle ČEZ_ME_0980 [5].

Závěr

U heterogenních svarových spojů je nutné očekávat sníženou životnost v porovnání s homogenními spoji. Kořenovou příčinou urychleného poškození heterogenních svarových spojů trasy RY se jeví kombinace zvoleného přídavného austenitického materiálu typu Cr16Ni25Mo6, napětí od rozdílné teplotní roztažnosti a přítomnosti vodného prostředí. Použitý austenitický materiál byl příčinou vzniku řady heterogenit (kompoziční, fázové, kontinuální povahy), jejichž přítomnost vyústila v etapovitý postup trhliny podél hranice ztavení svarovým kovem. Při splnění podmínek korozního a napěťově/deformačního zatěžování lze označit tento mechanismus jako korozní praskání pod napětím s časově i funkčně etapovitým průběhem, v němž mohly být i krátké úseky postupu trhliny realizovány lokálně nestabilním lomem [3,4,5,6,7].

Poděkování

Tento příspěvek vznikl na základě řešení projektu: Experimentální program na vybraných vyjmutých heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2.HVB ETE, kde hlavním řešitelem byl ÚAM Brno s.r.o. a spoluřešitelskými organizacemi byly FJFI ČVUT, ÚMI FS ČVUT, VŠCHT a ÚJV Řež, a.s.

Literatura

- [1] Ducháček P. (2013): *Heterogenní svarové spoje nových žárovevných ocelí pro vysokoparametrické elektrárny*. [Diplomová práce], FS ČVUT v Praze
 - [2] Ducháček P. (říjen 2016): *Experimentální program na vybraných vyjmutých heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2. HVB*, zpráva ČEZ, a.s., SK zvláštní procesy a TK strojní JE
 - [3] Janovec J., Junek M. (březen 2017): *Analýza heterogenních svarových spojů nátrubků N5.2, N6.1 a N6.2 parogenerátorů 2. HVB ETE*, technická zpráva č. 12-17
 - [4] Haušild P., Siegl J. a kol. (březen 2017): *Analýza defektů nalezených v heterogenních svarových spojích nátrubků PG2 2. HVB ETE*, zpráva FJFI ČVUT Praha, číslo zprávy V-KMAT-1003/17
 - [5] Junek L. a kol. (březen 2017): *Závěrečná zpráva k Experimentálnímu programu na vybraných heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2. HVB ETE*, zpráva ÚAM Brno, číslo zprávy ZP6062.docx
 - [6] Tonarová D., Brabec P., Burda J., Ernestová M. (březen 2017): *Hodnocení heterogenních svarových spojů odebraných z nátrubků PG 2. HVB ETE*, zpráva ÚJV Řež, a. s., číslo zprávy DITI 2302/437 Rev.1
- Bystrianský J. a kol. (březen 2017): *Příčiny poškození heterogenních svarových spojů nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2. HVB ETE*, zpráva VŠCHT, číslo zprávy z00_61_6072

VÝVOJ A VÝROBA VALIVÝCH KOROZIVZDORNÝCH LOŽISEK S KLECEMI Z TERMOPLASTICKÉHO POLYMERU PEEK PRO POUŽITÍ V SESTAVĚ REGULAČNÍCH POHONŮ PRO A PRO-M PRO JE VVER 440.

DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF ROLLING BEARINGS MADE OF STAINLESS STEELS WITH CAGES MADE OF THERMOPLASTIC POLYMER PEEK FOR USAGE IN NUCLEAR REACTOR VVER 440 CONTROL ROD DRIVE MECHANISM PRO AND PRO-M GROUP.

Martin Poledna

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Vývoj nových valivých ložisek pro použití v sestavách regulačních pohonů vyráběných firmou ŠKODA JS a.s. (dále jen ŠJS) a firmou SLB spol. s r.o. (dále jen SLB) byl realizován v důsledku závislosti na unikátním výrobcí těchto komponent z ruské federace. Jedním z cílů vývoje byla optimalizace materiálového složení jednotlivých komponent s ohledem na provozní podmínky ložisek. U klecí ložisek došlo k záměně původní ruské korozivzdorné martenzitické oceli 14Ch17N2, austenitické oceli 08CH18N10T (08X18H10T) dle předpisů GOST a TY, bronzu a fluoroplastu za termoplastický polymer Ketron PEEK 1000 (dále jen PEEK) a u valivých těles a kroužků ložisek došlo k záměně původních ruských martenzitických ocelí 95Ch18(-Š), (95X18-III) a 110Ch18M-ŠD (110X18M-IIIД) dle předpisů GOST za obdobnou martenzitickou korozivzdornou ocel AISI 440C (1.4125) dle norem ASTM.

Pro ověření komponent při simulaci reálných podmínek provozu na zkušebním standu ŠJS byl vytvořen komplexní program kontrol a zkoušek, který imitoval pracovní podmínky ložisek v sestavě pohonu regulačního orgánu (PRO nebo PRO-M) za stavů regulace, havarijní ochrany i práce pohonu v podmínkách bez zaplavení vodou. Vliv radiačního a teplotní stárnutí ložisek byl simulován ve spolupráci s ÚJV Řež, a.s.

Následně provedené kontroly a zkoušky prokazatelně potvrdily, že nový materiál PEEK splňuje veškeré požadavky při jeho použití v klecích valivých ložisek regulačních pohonů a díky své nižší hmotnosti a dobrým třecím vlastnostem přispívá k velmi dobrým provozním vlastnostem nových valivých ložisek. Stejně tak se potvrdilo, že použitá obdobná korozivzdorná martenzitická ocel AISI 440C má srovnatelné vlastnosti a odolnost vůči působícím vlivům pro navržený účel použití.

Všeobecné pracovní podmínky

Ložiska i samostatně dodávaná valivá tělesa jsou vyrobena z materiálů, které umožňují jejich práci ve vodě primárního okruhu reaktoru VVER 440 v souladu s požadavky projektu reaktorového zařízení při normálních i havarijních podmínkách stanovených pro pohony typu PROⁱ⁾ a PRO-Mⁱⁱ⁾. Především se jedná o prostředí s ionizujícím zářením, zvýšených teplot, tlaku a působení vody s definovaným chemickým složením.

Požadovaným materiálem pro výrobu ložisek (kroužků, ložiskových valivých těles) a samostatně dodávaných kuliček je korozivzdorná martenzitická ocel dle ASTM A276M grade 440C. Požadovaná tvrdost pro kroužky ložisek a valivých těles se musí pohybovat až kolem hodnoty 60 HRCⁱⁱⁱ⁾. Základní materiály pro výrobu kroužků, klecí, valivých těles ložisek a samostatných kuliček musí být doloženy materiálovým inspekčním certifikátem 3.1

dle EN 10204. Kroužky ložisek musí procházet tepelným zpracováním pro stabilizaci pro pracovní teploty do 350 °C (tj. popuštěno při teplotě 400 °C ÷ 420 °C). Stejný postup se doporučuje i u valivých těles, včetně samostatně dodávaných, pokud je to technicky možné. Způsob provedení tepelného zpracování nesmí negativně ovlivnit požadovanou tvrdost a finální povrchy dílů, zvláště pak ve smyslu ovlivnění korozní citlivosti.

Rozsah programu kvalifikace

Zkoušky korozní odolnosti a odolnosti proti účinkům dekontaminačních roztoků prokázaly, že vhodnost zvolených ekvivalentních materiálů do provozních podmínek je vyhovující. Z hlediska vizuální a makroskopické kontroly povrchu, hmotnostních úbytků, tvrdosti a drsnosti se ložiska SLB chovají ve zkušebním prostředí obdobně jako původní ložiska.

Zkoušky základní dynamické únosnosti, provedené výrobcem ložisek SLB na zkušebním stendu ZKL a.s. prokázaly, že požadovaná dynamická únosnost uvažovaná ve výpočtovém ověření pohonů PRO a PRO-M je dosažena (a dostatečná) na všech typech použitých ložisek. Zkoušky tvrdosti současně prokázaly, že požadované hodnoty tvrdosti lze na zvoleném materiálu zajistit při dodržení přesně definovaného postupu tepelného zpracování. Byla vypracována analýza rizik, která hodnotila veškerá rizika spojená s realizací vývoje ložisek. Analýza je zpracována od fáze volby vhodných základních materiálů, přes určení požadavků na základní provozní vlastnosti, určení požadavků na výrobní procesy a zkoušky u výrobce, až po určení požadavků na balení a konzervaci, požadavků na příjem a uskladnění komponent v ŠJS nebo na JE, v případě jejich dodávky jako samostatného náhradního dílu, dále požadavků na montáž do pohonů regulačních orgánů a požadavků na provozní kontroly a zkoušky, včetně procesů dekontaminace prováděných na JE. Analýza rizik současně posoudila rozsah programu ověřovacích zkoušek s ohledem na požadavky a provozní podmínky těchto komponent.

Výpočtové hodnocení trvanlivosti a statické únosnosti všech typů ložisek od firmy SLB zkušebních ve zkušebním pohonu PRO-M bylo provedeno s kladným závěrem. Ložiska splňují podmínky dle norem ČSN ISO 76 a ČSN ISO 281 i dle metodiky standardního programu FAG.

Pro posouzení vlivu radiačního stárnutí byly zkušební vzorky vyrobené z materiálu PEEK i kompletní ložiska s namontovanými klecemi z tohoto materiálu ozařovány v ÚJV Řež a.s. zářičem gama ze zdroje tyčového zářiče ⁶⁰Co při průměrném dávkovém příkonu cca 0,64 kGy/h po dobu čistého času 238 hodin, včetně jednorázového ozáření integrální dávkou 1,5 kGy, jejíž působení je předepsáno projektem jako havarijní stav. Celková integrální dávka během ozařování tak dosáhla úrovně cca 153±19 kGy, což odpovídá požadované projektové životnosti ložisek 25 let.

Po provedení radiačního stárnutí byly stejné vzorky podrobeny zrychlenému teplotnímu stárnutí, jehož průběh byl stanoven ve spolupráci s ÚJV Řež a.s. na základě Arrheinova vztahu. Pro požadovanou životnost 25 let bylo zrychlené stárnutí provedeno při teplotě 180 °C a tlaku 12,3 MPa po dobu 50 dnů, včetně simulace krátkodobého zvýšení teploty během havarijních stavů na hodnotu 200 °C po dobu 40 hodin. Jako limitní materiál pro stanovení programu zrychleného stárnutí byl uvažován nový materiál klecí ložisek, tedy materiál PEEK a byla použita konzervativní hodnota aktivační energie o hodnotě $E_A = 0,95$ eV.

Funkčnost všech typů ložisek po provedení radiačního i teplotního stárnutí a samostatných valivých kuliček byla ověřena zkouškou ve zkušebním pohonu konstrukčního uspořádání PRO-M ve zkušebním kanále na stendu v ŠJS simulací tlakově-teplotních parametrů reaktoru VVER 440 za stavů regulace, havarijní ochrany i práce bez vody (bez zaplavení vodou).

Hodnocení programu kvalifikace

Hodnotící materiálová zpráva Ae17085/Dok [1] byla vydána za účelem posouzení a realizace náhrady původních typů valivých ložisek a samostatných valivých těles dodávaných z Ruské federace dle původních technických podmínek TY 4300 a TY ВНИПП.080-00 za nové typy valivých ložisek a samostatných valivých těles od dodavatele SLB, které se dodávají v souladu s technickými podmínkami ŠJS. Použitelnost materiálu PEEK při všech podmínkách, které jsou definovány pro projektovou životnost regulačních pohonů PRO-M, byla ověřena kvalifikačním programem realizovaným v ÚJV ŘEŽ a.s., jehož výsledky kvalifikačních zkoušek uvádí kvalifikační zpráva materiálu PEEK DITI 2305/220 [2], jejímž obsahem jsou i protokoly z kvalifikačních typových zkoušek provedených v akreditovaných laboratořích.

Výsledky materiálových zkoušek vzorků materiálu PEEK jednoznačně potvrdily, že tento materiál je vhodný pro daný účel použití a z hlediska vlivu působení možných degradačních činitelů, kterými jsou v daných podmínkách ionizující záření, zvýšená teplota, tlak a působení vody primárního okruhu reaktoru, nedochází k negativnímu ovlivnění jeho výchozích mechanických vlastností ani k ovlivnění jeho povrchové struktury.

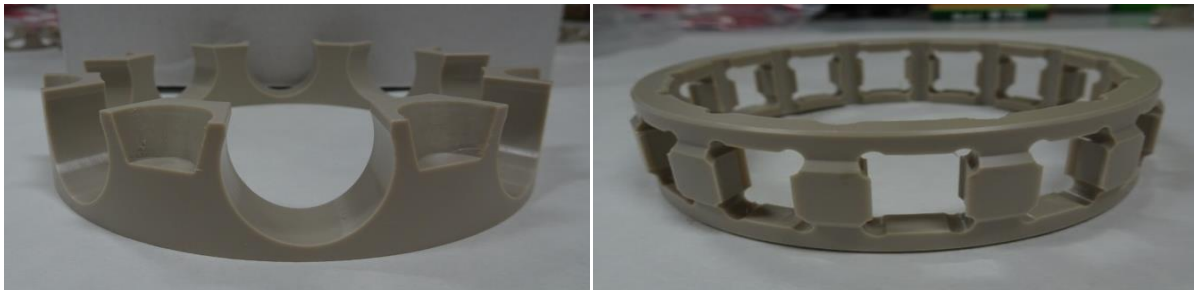
Výsledky zkoušek v sestavě zkušebního pohonu na standu ŠJS pak prokázaly, že ložiska SLB s klecemi z materiálu PEEK a samostatně dodávané kuličky jsou schopny plnit projektovou funkci pohonu při jeho požadované projekční životnosti 25 let (v případě přerušovaného provozu až 30letý) za normálních podmínek a za podmínek LOCA havárie na jaderné elektrárně VVER 440.

Zjištěné hmotnostní úbytky jednotlivých ložisek jsou téměř nezatelné a výsledky kontrol jejich opotřebení splnily očekávané předpoklady a limity stanovené ŠJS pro hodnocení jejich provozu v sestavě pohonu typu PRO nebo PRO-M. Ložiska i po dokončení předepsaných zkoušek byla schopná dalšího provozu, vykazovala velmi plynulý a rovnoběžný chod a to je i dobrým předpokladem jejich použití pro případy dalšího zvyšování nároků na chod pohonů PRO nebo PRO-M v režimu regulace jaderného reaktoru.

Celkové hodnocení výsledků všech provedených zkoušek, které je souhrnně uvedeno v hlavní kvalifikační zprávě ŠJS vydané pod číslem Ae15511/Dok [3], potvrdilo, že technické parametry dodávaných ložisek a samostatných kuliček od firmy SLB odpovídají projektovým požadavkům kladeným na tyto komponenty s ohledem na účel jejich použití a splňují veškeré nároky kladené na jejich bezpečný provoz v sestavách pohonů typu PRO a PRO-M vyráběných ve společnosti ŠKODA JS a.s.



Obr. 1: Samostatná klec (nalevo); Jednořadé kuličkové radiální ložisko (napravo)



Obr. 2: Vzorky samostatných klecí



Obr. 3: Jednořadé radiální kuličkové ložisko, typ 6214, vnější Ø: 125 mm; pohled z přední (otevřené nalevo) a zadní (uzavřené napravo) strany klece.



Obr. 4: Jednosměrné kuličkové axiální ložisko

Literatura

- [1] Poledna, M.,(2017): *Ae17085/Dok: Hodnotící zpráva záměny použitých materiálů valivých ložisek a samostatných kuliček v sestavě pohonů PRO a PRO-M. Plzeň: ŠKODA JS a.s.*
- [2] Fencel, Z., Plaček, V., Ernestová, M.,(2017): *DITI 2305/220: Zkoušky materiálu Ketron PEEK 1000 pro použití na klece valivých ložisek v prostředí vody primárního okruhu reaktoru VVER 440/V-213. Husinec: ÚJV Řež, a.s.*
- [3] Poledna, M.,(2017): *Ae 15511/Dok: Kvalifikační zpráva valivých ložisek a samostatných valivých těles od výrobce SLB pro použití v sestavě pohonů PRO a PRO-M. Plzeň: ŠKODA JS a.s.*

- i) PRO – pohon regulačního orgánu
- ii) PRO-M – pohon regulačního orgánu modernizovaný
- iii) HRC – zkouška tvrdosti dle Rockwella (indentorem je diamantový kužel)

OPRAVY SVAŘOVÁNÍM TURBÍNOVÝCH KOMPONENT SKŘÍNÍ Z CREEPOVĚ ODOLNÝCH OCELÍ

WELDING REPAIR OF TURBINE COMPONENT FROM CREEP RESISTANCE STEELS

Marek Slováček^{a)}, Josef Tejc^{a)}, Tomáš Richter^{a)}, Jaromír Moravec^{b)}, David Beran^{c)} a Jan Čech^{d)}

^{a)} MECAS ESI s.r.o, Brojova 16, 326 00 Plzeň

^{b)} Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, 461 17 Liberec

^{c)} SIEMENS s.r.o., Olomoucká 7/9, 618 00 Brno

^{d)} ŽĐAS a.s., Strojírenská 675/6, 591 01 Žďár nad Sázavou

Abstrakt

Během výroby, a i provozu turbínových komponent, a dále i jejich výroby, např., odlévání turbínových skříní vznikají vady, jak povrchové, tak i podpovrchové, které je třeba opravit. Společnosti SIEMENS, ŽĐAS a MECAS ESI pracují na vyvinutí technologií oprav na základě provádění experimentálních svarů, materiálových měření a numerických simulací. V předkládaném článku bude uveden celý program řešení pro opravné svařování turbínových komponent z oceli G17CrMoV5-10, G17CrMo5-5, X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1. Uvedený výzkum je prováděn i za podpory projektu MPO TRIO FV10510.

During manufacturing and nominal regime and casting of turbine components the surface and under surface cracks have been initiated. The cracks should be repaired. The companies SIEMENS, ŽĐAS and MECAS ESI have been working for welding technologies development based on material measurements, small mock ups experiments and numerical simulations. The complete technology development programs have been done for materials G17CrMoV5-10, G17CrMo5-5, X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1.

Úvod

Cílem celého projektu je vytvoření nových metodických postupů svařování a tepelného zpracování creepově odolných turbínových komponent, definujících posloupnost kroků potřebných při návrhu a realizaci nízkoteplotních oprav vad způsobených výrobními postupy, případně provozním zatížením. Jde o vytvoření technologických postupů (ověřených technologií), které budou odzkoušeny na reálných dílech a zařazeny do výrobního programu společnosti Siemens (odštěpný závod Industrial Turbomachinery v Brně).

Uvedené postupy budou realizovány pro 4 různé creepově odolné materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10, GX23CrMoV12-1 a GX12CrMoVNb9-1.

Hlavním cílem a současně i výstupem projektu je experimentální odzkoušení navržených postupů na reálných kusech, s následnou kvalifikací postupů certifikačními orgány, vytvoření WPQR a nastavení podmínek pro následné zavedení do výroby. Kvalifikované postupy oprav budou vytvořeny pro výše uvedené materiály jako výsledek celého projektu.

V roce 2016 byl proveden a ukončen kompletní vývoj opravných svařovacích technologií pro materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10 a v roce 2017 probíhá vývoj opravných svařovacích technologií pro materiály X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1. Ovšem v roce 2016 proběhl i vývojový projekt se společností ŽĐAS optimalizace opravy svařováním odlitku rotorových skříní z materiálu GX23CrMoV12-1.

V uvedeném článku bude popsán celkový postup řešení. Dále se článek bude detailněji zabývat numerickými metodami, které byly použity jako jedna z podpůrných činností projektu. Materiálovými experimenty a zkušebními svary se zabývá detailněji článek „Možnosti materiálových měření a experimentálních zkoušek pro oblasti energetiky -

posouzení vlivu svařovacího procesu na degradaci materiálu, autor Jaromír Moravec“, který je prezentován také na konferenci v Srni v roce 2017.

Hlavním benefitem používání numerických simulací svařování není obdržení pouze požadovaných výsledků (materiálová struktura, tvrdost, deformace, zbytkové napětí, celková plastická deformace), ale jde hlavně o pochopení celého procesu, co se během procesu svařování děje v materiálu. Ze zkušeností lze potvrdit, že na základě pochopení celého procesu je daleko snadnější udělat jakoukoliv změnu. Výhodou numerické simulace je, že lze získat kompletní informace během celého výrobního procesu a je možné se „podívat“ do materiálu a do jakéhokoliv místa na konstrukci, což je jinak nemožné. Je zřejmé, že ani sebelepší měření nezajistí stejné informace, jako numerická analýza. Navíc, lze na počítači provést několik variantních technologií a porovnat jejich výsledky, tzn., jejich rozdíly.

Postup řešení

Celý projekt je složen z několik na sobě navazujících následujících činností:

Materiálové experimenty

Pro každý materiál jsou, resp., byly provedeny následující materiálová měření:

- a) ARA diagram
- b) Tahové zkoušky základního materiálu s uvažováním vlivu teploty
- c) Tahové zkoušky jednotlivých struktur (převážně martenzit a bainit) s vlivem uvažování teploty
- d) Tahové zkoušky popuštěných struktur
- e) Stanovení koeficientu tepelné roztažnosti
- f) Naměření popouštěcího diagramu
- g) Provedení krátkodobých creep testů

Materiálová měření byla provedena s cílem získat maximální množství poznatků o použitých materiálech pro další rozhodování o navržených technologiích svařování a především jako podklad pro numerické analýzy svařování, tzn., k vytvoření materiálových databází a dále byly použity jako limitní hodnoty pro hodnocení možnosti vzniku vad.

Provedení kontrolních návarů

Byly provedeny základní kontrolní návary, jak na desky, tak do drážek. Byly vždy provedeny všechny navržené varianty (různé teploty přehřevu, různé svařovací příkony, různé přídavné materiály, různé režimy tepelného zpracování atd.) a byly vždy vyhodnoceny makro výbrusy svaru a tepelně ovlivněné oblasti a měření tvrdosti (v případě, že bylo použito tepelné zpracování, tak tvrdost byla vždy měřena po svařování, a i po tepelném zpracování). Výsledky kontrolních svarů byly rovněž použity k validaci numerických řešení.

Numerické simulace kontrolních návarů

Byly provedeny numerické simulace kontrolních návarů s cílem validovat numerické metody, tzn., především ověřit vytvořené materiálové databáze, dále nalézt správné parametry pro použité svařovací technologie. Ovšem, hlavním cílem je získat informace o procesu pro zvolené varianty technologií, tzn., stanovit pro jednotlivé technologické varianty výsledky jako jsou podíl materiálové struktury, tvrdost, zbytkové napětí a kumulativní plastická deformace ve svarovém spoji, tzn., jak ve svarovém kovu, tak i v teplotně ovlivněné oblasti.

Návrh finální technologie svařování oprav

Na základě již provedených prací, tzn., materiálového měření, provedení kontrolních svarových spojů a numerických analýz je proveden návrh finální technologie opravy, který bude uskutečněn za téměř „reálných“ podmínek oprav, tzn., především jde o velikost opravované oblasti

Numerické simulace skutečných svarových spojů

Byla provedena numerická analýza navržené finální opravy a byly uvažovány všechny reálné podmínky opravy, tzn., opět jde hlavně o velikost opravované oblasti. Na základě výsledků z numerické simulace bylo rozhodnuto o proveditelnosti reálné opravy jako finálního experimentu.

Provedení skutečných svarových spojů

Provedení simulované reálné opravy dle technologického postupu, který byl ověřen numerickou analýzou. Z provedené opravy, která byla podrobena NDT zkouškám, jsou odebrány i vzorky na experimentální zkoušky.

Vytvoření ověřených technologií

Vytvoření a potvrzení ověřených technologií

Numerické simulace svařování turbínových komponent z materiálu G17CrMo5-5

V uvedené kapitole budou představeny možnosti a výsledky numerických simulací, které sloužily jako podpora vývoje technologie oprav svařováním turbínových komponent z materiálu G17CrMo5-5.

Dle programu vývoje technologií oprav, prvním krokem provádění numerických analýz byla validace materiálových databází a validace parametrů tepelných zdrojů. Na obr. 1 je uveden základní validační model návaru na desku a na obr.2 je uveden řez modelem, který odpovídá vyvaření drážky. Na uvedených výpočetních modelech byly převážně porovnávány velikosti natavených oblastí a velikosti teplotně ovlivněných zón a dále byla validována hodnota tvrdosti, vždy byly porovnány vypočtené hodnoty s experimentem. Na obr. 3-5 je uveden jeden z experimentálních návarů jednotlivých housenek pro různé technologické parametry a jednotlivé makro výbrusy. Na obr. 6 a 7 jsou uvedeny natavené oblasti (červená barva) a teplotně ovlivněné oblasti (zelená barva) pro navaření jedné housenky pro různé průměry elektrod, samozřejmě i pro jiné svařovací parametry. Na obr. 8 je uveden makro výbrus pro vyvaření drážky a na obr. 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti v jednotkách Vickerse. Na obr. 10 je opět uvedená roztavená oblast a teplotně ovlivněná oblast pro navaření 10 vrstev do drážky. Na obr. 11 jsou uvedeny i hodnoty vypočtené tvrdosti v jednotkách Vickerse. Celkem v uvedené etapě byly provedeny 4 technologické varianty návarů na desku a 3 technologické varianty svařování do drážky. Na základě provedených variantních numerických analýz a experimentálních svarů byl navržen postup pro provedení finální opravy, do drážky 38 mm hluboké s použitím 40 svarových housenek. Byly použity 4 různé průměry elektrod s svařovací parametry. Dále byla použita teplota předehřevu 400 °C, teplota interpass 480 °C a po dohřevu následovalo nízkoteplotní tepelné zpracování na teplotě 550 °C. Na obr. 12 je uveden řez výpočtovým modelem. Na obr. 13 je uveden podíl martenzitické struktury ve svarovém spoji, zbytek do 100% odpovídá bainitické struktuře. Samozřejmě, uvedené struktury jsou silně popuštěné, díky tepelnému zpracování po svařování. Na obr. 14 jsou uvedeny numericky predikované tvrdosti dle Vickerse a maximální hodnota je okolo 330 HV. Na obr. 15 jsou uvedeny hodnoty redukovaného zbytkového napětí a maximální hodnota dle numerické analýzy dosahuje 700 MPa, což dle limitních hodnot z materiálového měření je pro uvedenou technologii a použité materiály v oblasti bezpečné a s vysokou pravděpodobností nevyvolá vznik vad z důvodu materiálové struktury a zbytkového napětí.

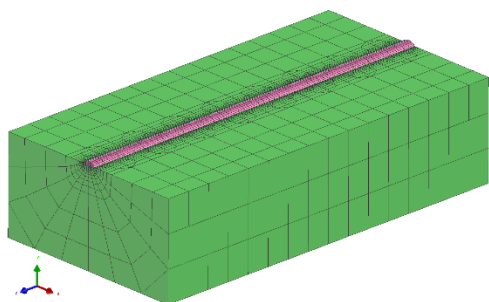
Oprava turbínové skříně z materiálu GX23CrMoV12-1

Na odlitcích turbínových komponent z materiálu GX23CrMoV12-1 jsou nalezeny vady, které je potřeba opravit. Bohužel, i během oprav se opět objevují vady, většinou podpovrchové vady ve větší hloubce nebo v místech, kde je kumulace více vad na malém prostoru. Uvedený projekt byl proveden pro společnost ŽDAS. Na uvedeném projektu je zřejmý benefit použití numerické analýzy z důvodu možnosti analýz jednotlivých variant s cílem pochopení procesu a chování materiálu. Na obr. 16 je uveden výpočtový model, kde byly uvažovány tři opravné svary, pro hlubokou podpovrchovou vadu (oblast 1), pro dlouhou podpovrchovou vadu (oblast 2) a pro opravu návarem na povrch (oblast 3).

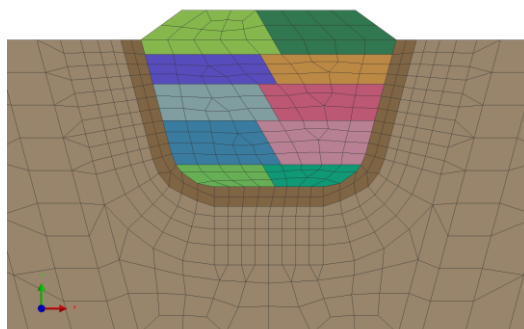
Jako první analýza, varianta 1, byla provedena varianta dle WPS, tzn., s ideálními podmínkami, tzn., jde hlavně o teplotu předehřevu 300 °C a teplotu interpass 400 °C. Výsledná struktura v opravných svarech byla převážně bainiticko s malým množstvím martenzitu, viz obr.17. Na vypočtených výsledcích nebyly identifikovány žádná místa s možnostmi vzniku vad, protože maximální hodnota redukovaného zbytkového napětí byla okolo 600 MPa, viz obr.20. Další numerická analýza, varianta 2, byla provedena pro variantu teploty předehřevu 200 °C a interpass teplotu 300 °C. Uvedená varianta byla provedena z důvodu, že při reálné opravě je velmi obtížné obdržet parametry teploty předehřevu 300 °C a teploty interpass 400 °C a chtěli jsme identifikovat rozdíly ve výsledcích pro uvedené varianty. Materiálová struktura v opravovaných částech je již plně martenzitická, viz obr. 18. Maximální hodnota redukovaného napětí je okolo 800 MPa, viz obr.21, což stále pro uvedený materiál není kritická hodnota. Navíc vady, které vznikaly během oprav, se vyskytovaly v přídatném materiálu, ale numerické analýzy identifikují maximální hodnoty v teplotně ovlivněné oblasti. Na základě uvedených výsledků jsme se zaměřili na přídatný materiál Chromet 12MV, který dle intervalu chemického složení by měl být podobný jako základní materiál. Ovšem dle dodaného atestu byly identifikovány rozdíly. Byla numericky stanovena a potom i experimentálně ověřena teplota martenzitu start pro přídatný materiál 280 °C, což je o 30 °C výše než pro základní materiál, což bylo použito i v původních numerických analýzách. V třetí numerické analýze, variantě 3, byla použita teplota předehřevu 200 °C, interpass teplota 300 °C a hlavně byla změněna teplota martenzitu start pro přídatný materiál z 250 na 280 °C. Výsledky redukovaných napětí jsou uvedeny na obr. 22. Z obr. 22 je zřejmý výrazný nárůst redukovaného napětí v přídatném materiálu na 1100 MPa, což je hodnota na mezi pevnosti uvedeného materiálu (informace přebrána z materiálových měření uvedené oceli), tzn., je zde i velká pravděpodobnost vzniku vad. Numerická analýza odhalila velký vliv teploty martenzit start na hodnotu zbytkové napjatosti, tzn., i následné správné použití teploty předehřevu a interpass teploty. Je velmi překvapující, že relativně malá změna teploty martenzit start o pouhých 30 °C vyvolá, tak výrazný nárůst zbytkové napjatosti. Je zřejmé, že u uvedené oceli, resp. obecně martenzitických ocelí je potřeba teplotu předehřevu a interpass teplotu optimalizovat dle skutečného chemického složení oceli, tzn., hlavně dle teploty martenzit start a nelze používat jednu teplotu obecně.

Závěr

V článku byl představen postup návrhu vývoje oprav turbínových komponent. Vývoj byl, resp. stále je zaměřen na creepově odolné materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10, GX23CrMoV12-1 a GX12CrMoVNb9-1. Kompletní vývojový program zahrnoval jak experimentální měření, tak provedení kontrolních svarů, tak i provedení reálné zkoušky opravy svařováním. Dalším podpůrným prostředkem ve vývoji oprav turbínových komponent byly i numerické simulace svařování, na které byl zaměřen uvedený příspěvek. Bylo provedeno stručné shrnutí provedených prací, které bylo demonstrováno na vývojovém projektu pro materiál G17CrMo5-5 a industriálním projektu pro materiál GX23CrMoV12-1.



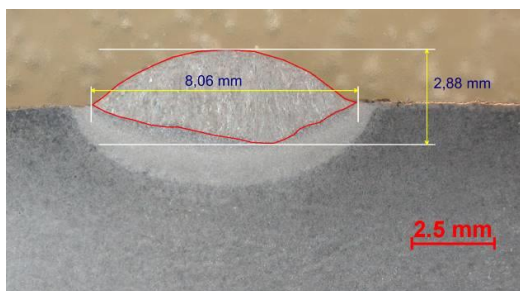
Obr.1 Výpočetní model návaru na desku



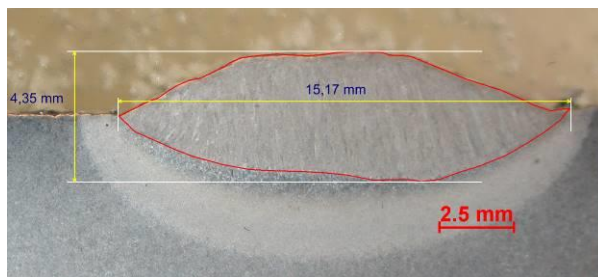
Obr.2 Výpočetní model v řezu navařování do drážky



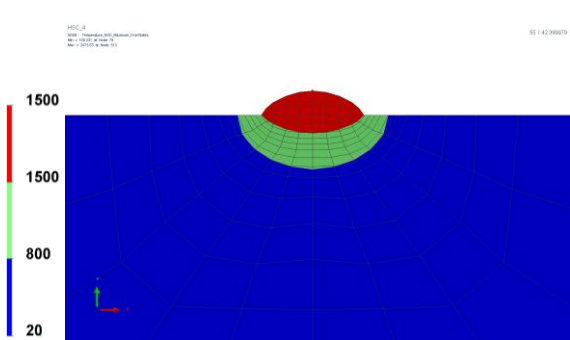
Obr. 3 Provedené experimentální svary pro různé technologické parametry



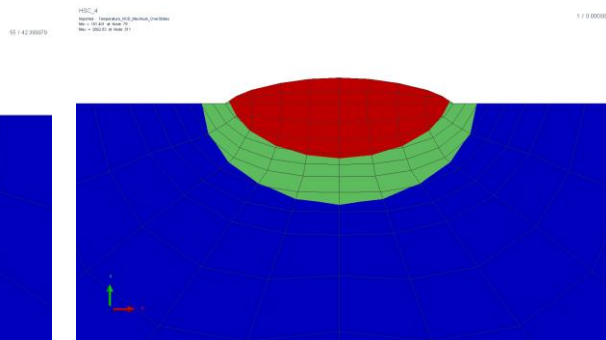
Obr.4 Makro výbrus, elektroda ϕ 2,5 mm



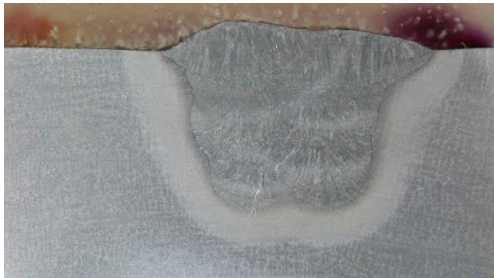
Obr.5 Makro výbrus, elektroda ϕ 5 mm



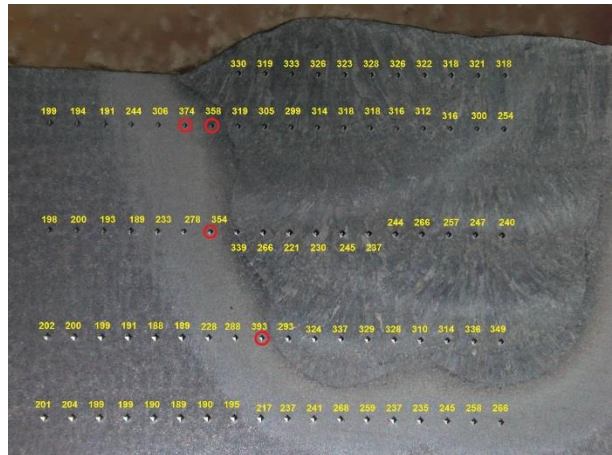
Obr.6 Teplotní pole, elektroda ϕ 2,5 mm



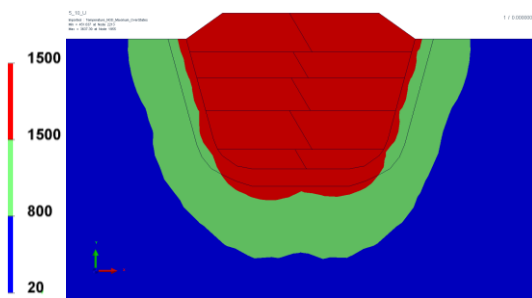
Obr.7 Teplotní pole, elektroda ϕ 5 mm



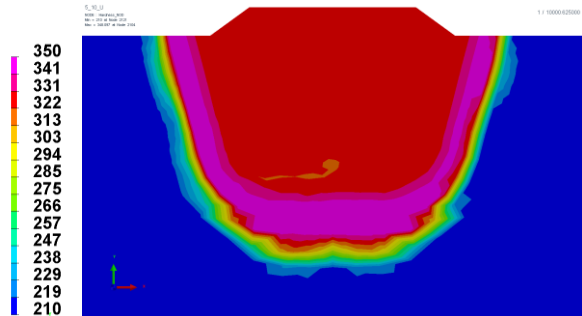
Obr. 8 Makro výbrus, vyvaření drážky



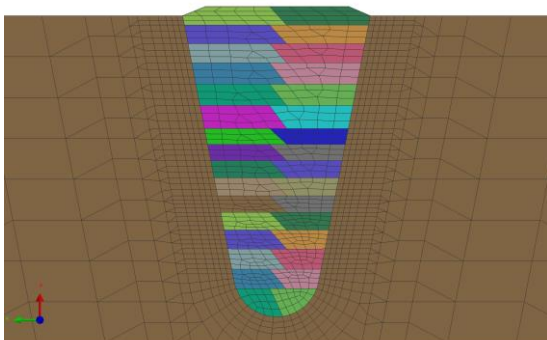
Obr. 9 Měření tvrdosti HV, vyvaření drážky



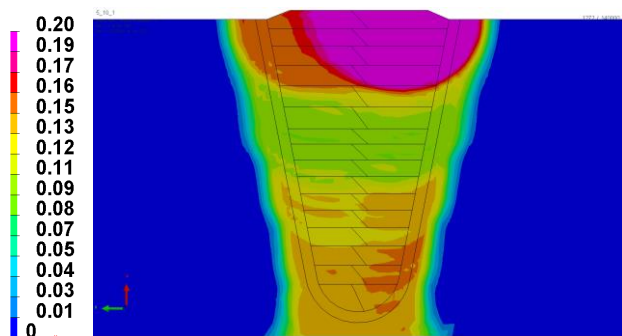
Obr.10 Teplotní pole, vícevrstvý návar



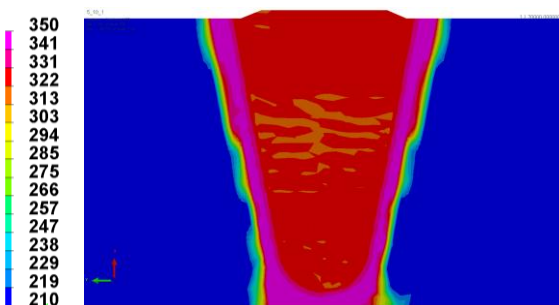
Obr.11 Tvrdosti v jednotkách HV



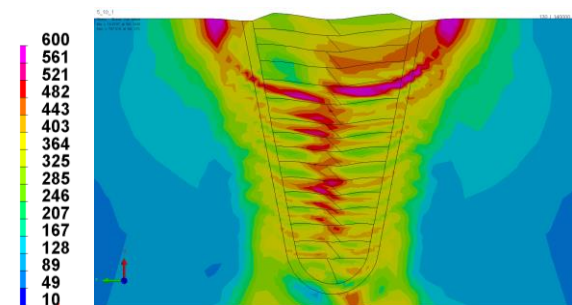
Obr.12 Výpočtový model



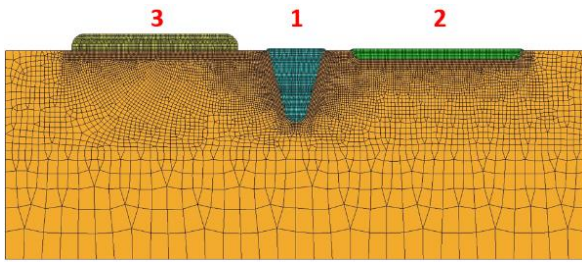
Obr.13 Podíl martenzické struktury



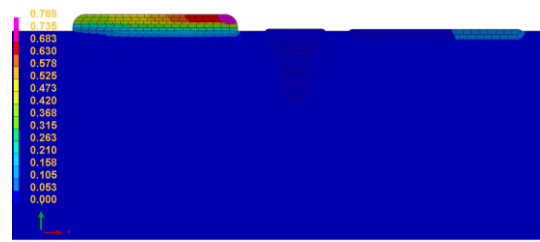
Obr.14 Tvrdosti v jednotkách HV



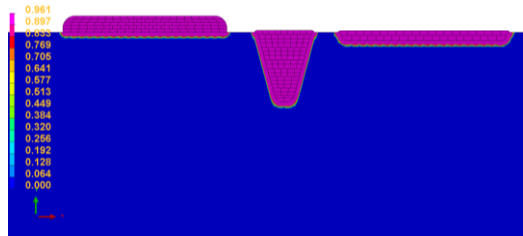
Obr.15 Zbytkové redukované napětí



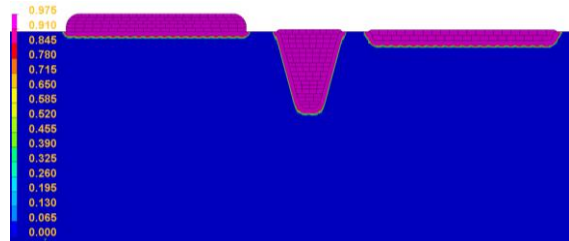
Obr.16 Výpočetní model



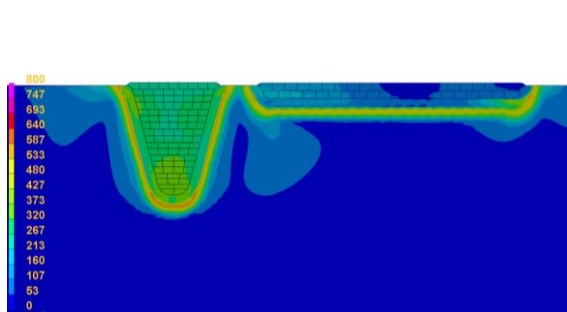
Obr.17 Množství martenzitu pro variantu 1



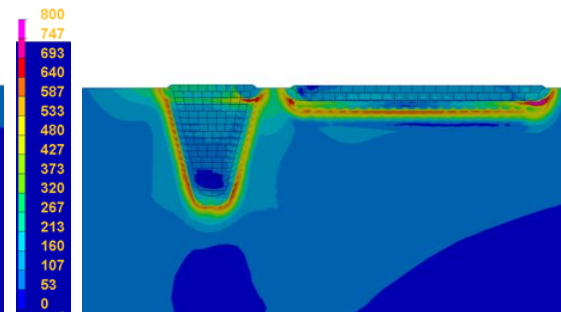
Obr.18 Množství martenzitu pro variantu 2



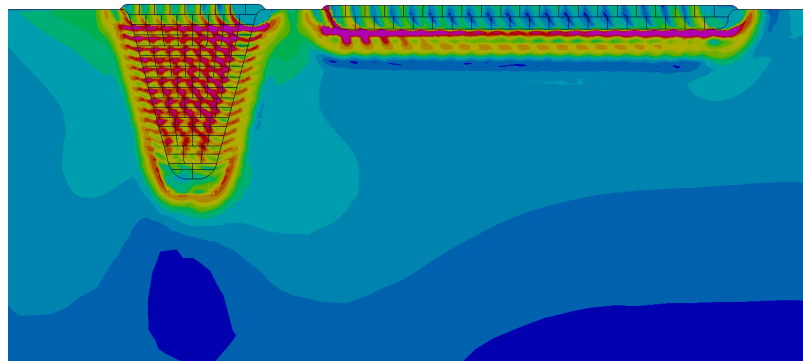
Obr.19 Množství martenzitu pro variantu 3



Obr.20 Zbytkové napětí pro variantu 1



Obr.21 Zbytkové napětí pro variantu 2



Obr.22 Zbytkové napětí pro variantu 3

MOŽNOSTI MATERIÁLOVÝCH MĚŘENÍ A EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK PRO OBLAST ENERGETIKY - POSOUZENÍ VLIVU SVAŘOVACÍHO PROCESU NA DEGRADACI MATERIÁLU

POSSIBILITIES OF THE MATERIALS MEASUREMENTS AND EXPERIMENTAL TESTS IN THE ENERGETICS SECTION – EVALUATION INFLUENCE OF THE WELDING PROCESS ON THE MATERIAL DEGRADATION

Jaromír Moravec a Iva Nováková

Technická universita v Liberci

Abstrakt

V rámci řešení projektů TACR a MPO bylo provedeno množství svařovacích experimentů a měření materiálových dat na ocelích 10GN2MFA, P91, P92 a X23CrMoV12-1, majících za cíl popsat a pochopit děje, k nimž při svařování dochází. Porozumět celému procesu a ne pouze získanému výsledku pomáhají numerické simulace. K tomu je však třeba získat a naměřit vstupní veličiny a údaje, mezi něž ARA diagram, mechanické zkoušky základních materiálů i materiálů podrobených teplotním cyklům, popouštěcí diagramy a krátkodobé creepové testy, případně testy akcelerovaného creepu. Mimo to byly navrženy a měřeny cílené testy zaměřené na nízkocyklovou a teplotní únavu realizované pomocí fyzikálně – mechanického simulátoru GLEEBLE. Cílem příspěvku je ukázat, jak by měly být koncipovány experimenty z hlediska dostatečné vypovídající hodnoty i z hlediska následné interpretace výsledků.

In terms of solving projects TACR and MPS there were performed a lot of welding experiments and measurement the material data for steels 10Gn2MFA, P91, P92 and X23CrMoV12-1 with aim to describe and understand processes that accompany own welding process. Thus as a major aim there was to understand the whole process, not only to measure results for the numerical simulations. However to achieve such goal, it is necessary to obtain and measure input quantities and data as is e.g. TTT diagram, mechanical tests of basic materials as well as temperature cycles loaded materials, tempering diagrams and short-term creep test, even. in the form of accelerate creep tests. Moreover there were designed and measured tests focused on the low-cycle and temperature fatigue loading by means of the physical – mechanical simulator GLEEBLE. The aim of paper is to show how there should be designed experiments in light of the sufficiently enough significance as well as the subsequent interpretation of results.

Úvod

Při svařování rozměrných konstrukcí, je nezbytné realizovat experimentální měření popisující odezvu materiálu na teplotně-napěťové zatížení. To je zpravidla způsobeno nestacionárními teplotními poli, vlastní tuhostí a způsobem upnutí svařovaného dílu. Takové experimenty je vhodné realizovat již v předvýrobní etapě, aby bylo možné na základě získaných výsledků upravit postup výroby a případně i konstrukční návrh. Vhodnost navržených postupů je pak velmi často verifikována pomocí numerických simulací.

K získání relevantních výsledků je ale nezbytné realizovat množství experimentálních měření. Taková měření mohou být koncipována buď jako experimenty definující vstupní veličiny numerických simulací, případně podklady pro výrobní postupy (velikost natavené oblasti, veličiny potřebné k definování modelu zdroje tepla, podmínky při upnutí vzorku atd.), nebo jako experimenty verifikační určené k potvrzení vhodnosti navrženého postupu, mezi něž patří například strukturní analýzy, hodnoty tvrdosti v definovaných místech, deformace

vzorku atd.). Vhodně navržený je však takový experiment, který v sobě dokáže zahrnout oba zmíněné typy měření.

Prvotní experimenty se zpravidla provádějí před vlastními výpočty a velmi často vycházejí ze svařovacích postupů zavedených ve výrobních firmách. Většinou se jedná o experimenty svařování koncipované na základě normy ČSN EN ISO 15614-1, kdy je známa jak velikost zkušebních těles, geometrie svarových úkosů, postup kladení housenek, tak také rozmezí svařovacích proudů, napětí a rychlosti svařování. Navíc se provádí metalografický rozbor a měření tvrdosti, takže jsou k dispozici údaje o natavené oblasti a tvrdosti ve svaru i TOO.

Přestože lze díky takto koncipovaným experimentům získat mnoho užitečných informací o procesu, stále ještě existuje značné množství neznámých majících značný vliv nejen na dosažené výsledky a přesnost simulačních výpočtů, ale také na provozní a únavovou životnost svarových spojů. Tyto neznámé lze částečně eliminovat vhodnou volbou okrajových podmínek experimentu. Jedná se především o definování podmínek přestupu tepla do okolí, umístění čidel pro měření teploty a deformací, způsob vzájemného přesazení housenek, atd.

Návrh a realizace svařovacích experimentů

Při experimentech svařování s předehřevem i bez něho je z hlediska správného stanovení nestacionárních teplotních polí problematické především definování podmínek, za nichž dochází k přestupu tepla do okolí. Při svařování bez předehřevu jsou problematická zejména ta místa, ve kterých dochází ke styku svařence s podložkou nebo přípravkem. Při svařování s předehřevem je pak jednou z hlavních podmínek zachování zvolené teploty předehřevu po celou dobu experimentu.

Při návrhu experimentu svařování bez předehřevu je tedy snaha o minimalizaci plochy dotyku vzorku s přípravkem. Proto jsou konstruovány speciální přípravky s bodovým, nebo liniovým dotykem, tak jak je ukázáno na obrázku 1a). Experiment by měl dále být koncipován tak, aby bylo možné měřit zároveň teplotní cykly i deformace v průběhu celého postupu svařování a chladnutí, případně i při následném tepelném zpracování.

Při experimentech svařování s předehřevem je pak jednou z hlavních podmínek zachování zvolené teploty předehřevu po celou dobu experimentu, tedy zajištění konstantního přenosu tepla celou spodní plochou vzorku. Toho lze dosáhnout buď použitím speciálně vytvořených předehřívacích desek, topných deček, nebo přípravků s dostatečně naakumulovaným množstvím tepla. Poslední varianta má ještě další výhody, mezi které patří zejména jednoznačné definování míst a tuhosti připevnění vzorku, nebo možnost jednoduché izolace celého systému, jak je ukázáno na obrázku 1b).

Oba typy experimentů by měly být navrženy pro vícevrstvé svary, protože každá následující vrstva násobí případnou nepřesnost při simulaci vrstvy předchozí. Pak je již po dvou, případně třech svarových housenkách zřejmé, zda je použitý výpočetní model vhodný pro daný typ úlohy. Experiment by měl být také koncipován tak, aby bylo možné jednoduše zjistit geometrii každé svarové housenky, včetně vlivu svarové vrstvy na změnu strukturních a mechanických vlastností, případně na deformace.

To je zpravidla realizováno vzájemným posunutím počátků jednotlivých housenek vůči sobě tak, jak je ukázáno na obrázku 2. Tímto způsobem lze geometricky vyhodnotit nejen každou housenku, ale také definovat, jak bylo konkrétní místo vzorku ovlivněno všemi ostatními housenkami. Vhodnou metodou k definici materiálových změn v místě svařování je měření tvrdosti. Využívá se zpravidla metoda podle Vickerse, kdy je tvrdost měřena v řadách ze základního materiálu, přes TOO až do svarového kovu, tak jak je schematicky znázorněno na obr. 2. Při svařování více vrstev je řada vpichů vedena vždy přes každou vrstvu, aby bylo možné posoudit vliv jednotlivých housenek na libovolné místo vzorku.

Měření materiálových vstupních veličin

Materiálová vstupní data určená pro numerické simulace jsou zpravidla rozdílná oproti údajům zjišťovaným pro návrh postupu svařování WPS. Pro teplotně strukturní analýzy je nezbytné znát chemické složení materiálu a ARA diagram, u něhož jsou pro dané rychlosti ochlazování uvedeny nejen tvrdosti, ale také podíly jednotlivých strukturních fází. Dále pak teplotní závislosti teplotní vodivosti a součinitele přestupu tepla do okolí. K výpočtu hodnot zbytkových napětí a deformací v průběhu svařování jsou pak třeba údaje o teplotní závislosti Youngova modulu pružnosti, meze kluzu, meze pevnosti, Poissonovy konstanty a hodnot deformačního zpevnění. Všechny uvedené údaje je možné zjistit z tahových zkoušek realizovaných za různých teplot. Taková měření jsou prováděna jak pro základní materiál, tak také pro zakalené a případně i popuštěné struktury. K výpočtu deformací je pak určena křivka teplotní závislosti součinitele lineární roztažnosti, zjištěná pomocí dilatometrických měření.

Velmi důležitým typem experimentu udávajícím informace o změně vlastností při tepelném zpracování jsou tzv. popouštěcí diagramy. Popisují změnu tvrdosti v závislosti na popouštěcí teplotě a době výdrže. Příklad takového diagramu je pro materiál GX23CrMoV12-1 a popouštěcí teploty 500; 550 a 600 °C uveden na obrázku 3.

Doplňkovými měřeními jsou pak informace o creepovém chování materiálu. Ty jsou získávány buď z klasických creepových testů, nebo (především z důvodu časové a finanční náročnosti) pomocí krátkodobých creepových, případně relaxačních testů. Zatímco při creepu je pro danou teplotu a zatížení sledováno prodloužení vzorku, u relaxačních testů jsou při dané teplotě a dosažené hodnotě napětí zafixovány čelisti a sleduje se časová změna hodnot napětí v testovaném vzorku. Pro krátkodobé creepy i relaxační testy je zpravidla využíván teplotně napěťový simulátor Gleeble.

Závěr

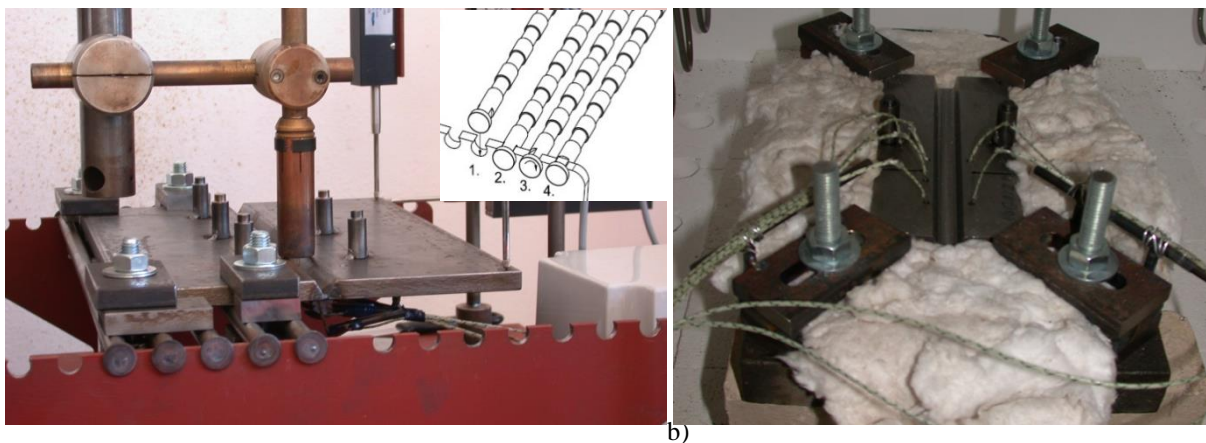
Materiálová měření a experimenty svařování patří mezi nejčastěji realizovaná měření určená k získání informací o materiálových změnách a nepřímo také k pochopení celého procesu za pomoci numerických simulací. Hlavním cílem příspěvku bylo ukázat, jakým způsobem by měly být navrženy a realizovány experimenty, aby byly získány relevantní informace. Pozornost byla zaměřena především na okrajové podmínky týkající se sdílení tepla do okolí, ale popsány byly i typy materiálových měření potřebných pro teplotně – metalurgické a napěťovo – deformační analýzy.

Na popis změn, k nimž dochází v materiálu při svařování, mají největší vliv nestacionární teplotní pole a podmínky, za nichž je realizován přestup tepla do okolí. To se týká jak míst styku svařovaného vzorku s pracovním stolem nebo přípravkem, tak míst vzorku předehřátých na technologicky požadované teploty. Teplotní cykly při svařování i případném následném tepelném zpracování ovlivní a částečně i degradují materiálové vlastnosti svařovaných dílů. V rámci prezentace proto budou představeny postupy a dosažené výsledky experimentálních měření a materiálových analýz pro výše uvedené materiály.

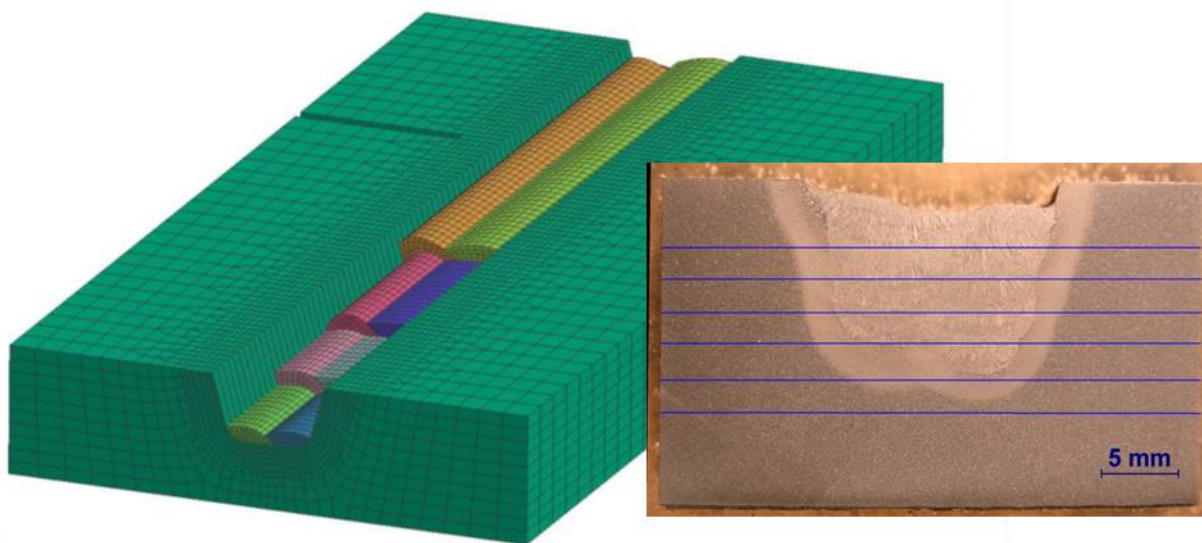
Příspěvek vznikl za podpory grantového projektu MPO TRIO FV10510

Literatura

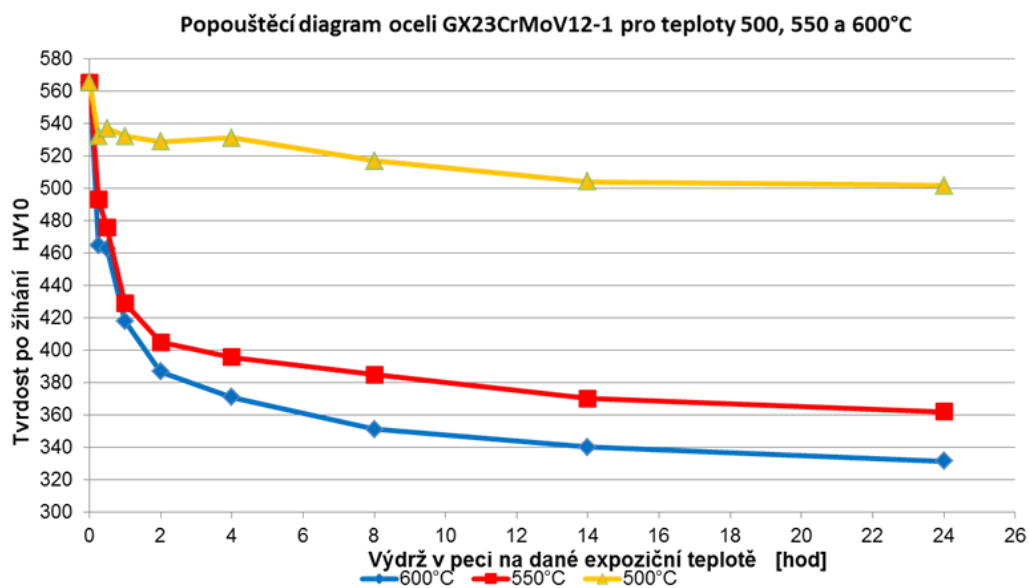
- [1] Moravec, J. (2015): *Metodické postupy využitelné k získání vstupních veličin numerických simulací svařování a tepelného zpracování*. Habilitační práce, Liberec, TUL.



Obr. 1. a) Přípravek pro svařování bez předehřevu; b) Přípravek pro svařování s předehřevem



Obr. 2. Experiment s vícevrstvým svařováním, vzájemně posunutě housenky



Obr. 3. Popouštěcí diagram materiálu GX23CrMoV12-1 pro teploty 500; 550 a 600 °C

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SOUČINITELE OTĚRU MEZI PEREM A DRÁŽKOU VE SPODNÍ ČÁSTI TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU VVER 440/213 A VVER 1000/320

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FRETTING WEAR COEFFICIENT BETWEEN THE KEY AND THE GROOVE IN THE LOWER PART OF THE VVER 440/213 AND VVER 1000/320 REACTOR PRESSURE VESSEL

Ladislav Pečínka^{a)}, Svoboda J.^{b)} a Miroslav Žamboch^{a)}

^{a)}NRI Řež, Hlavní 130, 250 68 Husinec – Řež

^{b)}Centrum Výzkumu Řež s.r.o., Morseova 1245 / 6, 301 00 Plzeň

Vymezení problematiky

Na tlakových nádobách reaktorů VVER 440/213 a VVER 1000/320 provozované v EDU a ETE jsou prováděny provozní kontroly s periodou 96 měsíců EDU a 72 měsíců na ETE, kdy střídavě jsou prováděny kontroly z vnitřního a vnějšího povrchu v rozmezí 4, resp. 3 let. V rámci kontrol je z reaktorů vyvezeno palivo a šachta reaktoru vtažena do stínícího válce. Při jejím vytahování se vždy zjistilo, že potřebná síla je vždy větší než tíha šachty. Vzhledem k tomu, že ve spodní části je šachta vůči stěně tlakové nádoby vymezena osmi opěrami dle obr. 1 lze vyslovit domněnku, že ve spojení pero – drážka dochází v průběhu kampaně k otěru a k pravděpodobnému zadření. Modelové experimentální ověření je diskutováno v dalším Zkušební přípravek je uveden na obr. 2.

Program zkoušek

Zkoušky byly prováděny při třech různých hodnotách svislého zatížení, a to při velikostech $P_m = 1, 2$ a 3 kN. Zároveň bylo nutné získat výsledky pro parametry kmitání odpovídající amplitudám a frekvencím, které byly vypočteny pro oba druhy reaktorů VVER 440/213 a VVER 1000/320. Pro první byla zjištěna frekvence 16 Hz, pro druhý 25 Hz. Aby byly získány výsledky pro oba druhy frekvencí a zároveň pro 3 výše uvedené hodnoty svislého zatížení, byl zvolen následující program zkoušek:

Zkouška č. 1: svislá síla $P_m = 1$ kN, $A = \pm 4,7$ mm, $f_r = 16$ Hz, délka skluzu 5 km

Zkouška č. 2: svislá síla $P_m = 2$ kN, $A = \pm 4,7$ mm, $f_r = 16$ Hz, délka skluzu 5 km

Zkouška č. 3: svislá síla $P_m = 3$ kN, $A = \pm 4,7$ mm, $f_r = 16$ Hz, délka skluzu 5 km.

Po ukončení těchto zkoušek byly postupně přebroušeny dosedací plochy všech 6 vzorků a následovaly zkoušky při frekvenci $f_r = 25$ Hz.

Zkouška č. 4: svislá síla $P_m = 1$ kN, $A = \pm 3$ mm, $f_r = 25$ Hz, délka skluzu 5 km

Zkouška č. 5: svislá síla $P_m = 2$ kN, $A = \pm 3$ mm, $f_r = 25$ Hz, délka skluzu 5 km

Zkouška č. 6: svislá síla $P_m = 3$ kN, $A = \pm 3$ mm, $f_r = 25$ Hz, délka skluzu 5 km.

Všechny zkoušky byly provedeny při stejné rychlosti kmitání $v = 0,471$ m/sec.

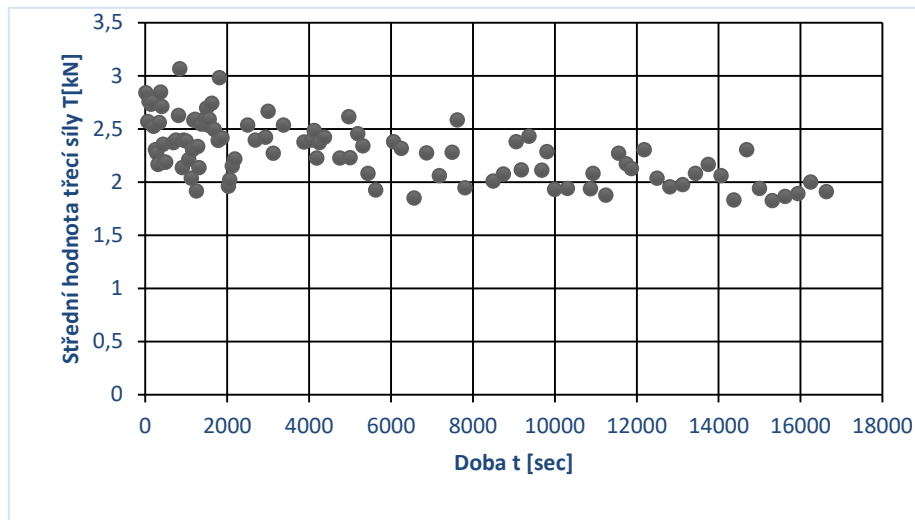
U všech zkušebních vzorků byla před zkouškami změřena tvrdost dosedacích ploch a v pěti paralelních řezech stanoveny hodnoty jakosti povrchu měřením na profiloměru. Tyto hodnoty pak byly porovnány s hodnotami po ukončení zkoušek.

Výsledky zkoušek

Zkoušky probíhaly ve výše zmíněném pořadí. V průběhu každé zkoušky byly odečítány maximální a minimální hodnoty třecí síly v závislosti na počtu odkmitaných cyklů. Tyto naměřené hodnoty byly zkorigovány o účinek setrvačných sil hmot připojených k siloměru podélného válce. Hodnoty třecích sil T uváděné dále jsou proto již skutečné hodnoty

odpovídající středním hodnotám tření mezi perem a drážkou závislé pouze na velikosti aplikovaných přitlačných sil P_m .

Třecí síla T se v průběhu zkoušky neustále měnila. Větších hodnot dosahovala v případě vytahování pera, menších hodnot při jeho zasouvání. Jak se měnila střední hodnota třecí síly T v závislosti na době kmitání t v případě zkoušky č. 1, ukazuje obr. 3.



Obr. 3 Průběh střední hodnoty třecí síly T v závislosti na čase t

Vypočítáme-li průměrnou hodnotu z těchto bodů, lze této hodnoty použít pro výpočet součinitele tření ze vztahu $f = T_{\text{prům.}} / P_m$. Zkorigujeme-li tuto hodnotu ještě o hodnotu čepového tření 0,16 v táhlech zatěžovacího přípravku, obdržíme výslednou hodnotu pro součinitel tření f . Stejným způsobem bylo postupováno u všech dalších zkoušek č. 2 ÷ 6.

Výsledky ze všech šesti provedených zkoušek jsou shrnuty v následující tabulce.

Svislá síla P_m [kN]	Třecí síla $T_{\text{prům.}}$ [kN] při frekvenci		Součinitel tření f při frekvenci		Velikost otěru G [g] při frekvenci			
	16 Hz	25Hz	16Hz	25Hz	16Hz		25Hz	
					pero	drážka	pero	drážka
1	2,29	1,68	2,13	1,516	0,765	6,229	1,17	4,41
2	3,8	3,06	1,74	1,37	2,3	10,2	3,38	16,38
3	5,81	3,98	1,78	1,17	1,9	13,05	13,93	4,05

Z tabulky vyplývá, že s velikostí přitlačné síly P_m třecí síla $T_{\text{prům.}}$ narůstá při nižší frekvenci rychleji, než při frekvenci vyšší. Nárůst třecí síly není lineární. Proto součinitel tření f s růstem přitlačné síly mírně klesá, přičemž jeho hodnoty při nižší frekvenci jsou vyšší, při vyšší frekvenci nižší.

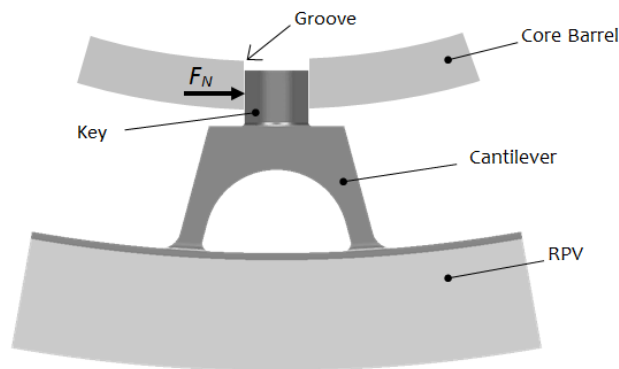
Podstatně větším problémem je vysledovat závislost v případě otěru. Při frekvenci 16 Hz otěr s růstem přitlačné síly P_m a tím i třecí síly $T_{\text{prům.}}$ narůstá. U pera s tvrdokovem je tento otěr menší, u drážky, která je z měkčího austenitického materiálu, je otěr větší. Závislost ovšem není lineární, protože při přitlačné síle $P_m = 3$ kN již docházelo k místnímu zadírání a k vydírání částeczek z měkčího materiálu drážky a v důsledku vyšší teploty mezi třenými plochami k tzv. kovářskému navařování těchto částeczek na plochu pera, jak je zřejmé z obr. 4.

Zajímavé výsledky byly získány při frekvenci 25 Hz. Při přitlačné síle 1kN je otěr bez zadírání zhruba 4x větší u drážky než u pera s povrchem z tvrdokovu. Při přitlačné síle 2 kN

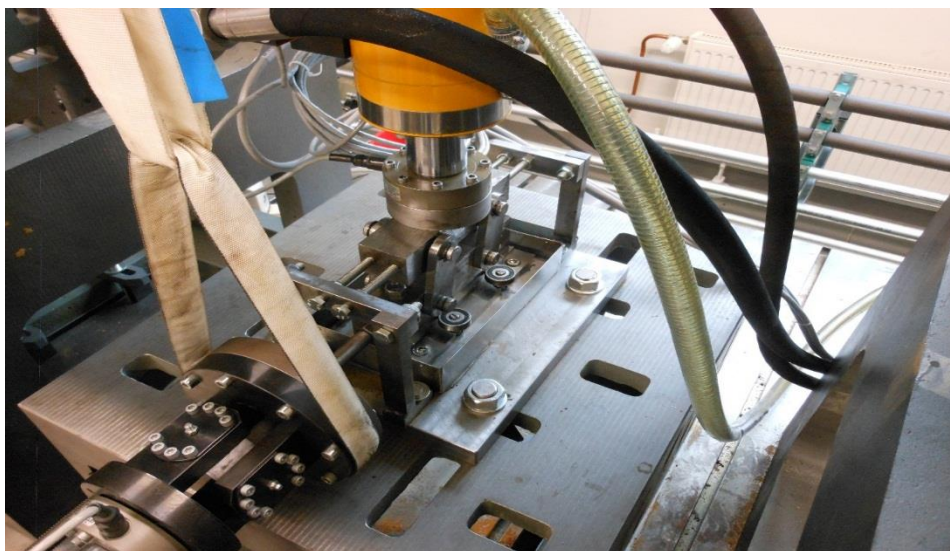
se v důsledku mírného zadírání zvýšil otěr u drážky. K překvapení však došlo při přítláčné síle 3 kN, kdy v důsledku velkého zadírání došlo k vytrhávání materiálu z povrchu pera a k jeho navařování na povrch drážky, jejíž otěr se tím snížil. Třené plochy po ukončení zkoušky jsou zřejmé z obr. 5. Opět se ukázalo, že přítláčná síla $P_m = 3$ kN mezi perem a drážkou je mezní síla, při které již dochází k zadírání pera v drážce. Kde a jak bude toto zadírání probíhat lze předem velmi obtížně předpovědět. Jedinou možnou příčinou může být pouze otřený materiál, který se nahromadí mezi otíranými plochami a v důsledku vysoké teploty třených ploch se navaří náhodně na některou z těchto ploch. Zřejmě potom nezávisí na tom, je-li jedna z ploch vyrobená z tvrdokovu, nebo základního austenitického materiálu.

Závěr

V příspěvku jsou shrnuty výsledky zkoušek otěru, které byly provedeny na vzorcích z austenitických materiálů odpovídajících materiálům per konzol tlakové nádoby a drážek ve stěně nosného válce reaktorů VVER 440/213 a VVER 1000/320. Ze všech zkoušek vyplynulo, že velikost třecí síly, součinitele tření i velikost otěru závisí významně na velikosti přítláčné síly. Při síle $P_m = 3$ kN již dochází k zadírání třených ploch. Pro možnost aplikace výpočtu otěru byly získány potřebné experimentální podklady.



Obrázek 1. Dvojice pero - drážka 1



Obr. 2 Úprava zkušebního přípravku s vodní nádržkou



Obr. 4 Třecí plocha zkušebních vzorků po ukončení zkoušky č. 3



Obr. 5 Třecí plochy zkušebních vzorků po ukončení zkoušky č. 6

VÝROBA VZORKŮ PRO EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ SOUČINITELE OTĚRU PERA TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU A DRÁŽKY ŠACHTY REAKTORU VVER 440/213 A VVER 1000.

PRODUCTION OF SAMPLES FOR EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FRETTING WEAR COEFICIENT BETWEEN THE REACTOR PRESSURE VESSEL KEY AND THE CORE BARREL GROOVE IN THE LOWER PART OF THE VVER 440/213 AND VVER 1000.

Libor Kratochvíl

ŠKODA JS a.s., Orlík 266, 31606 Plzeň

Abstrakt

Šachta reaktoru (dále ŠR) o tloušťce stěny cca 60mm je vyrobena z austenitické oceli 08Ch18N10T. Pero tlakové nádoby reaktoru (dále TNR) je vyrobeno austenitické oceli 08Ch18N10T s návarem elektrodou CN6. Tyto díly tvoří v konstrukci reaktorů VVER 440/213 a VVER 1000/320 třetí dvojici (viz Obr. 1), u níž může v důsledku tlakových pulzací vyvolaných hlavními oběhovými čerpadly docházet k otěru kontaktních ploch. U JE Dukovany byly pro montáž předepsány mezní velikosti vůle mezi pery TNR a drážkami ŠR pohybující se v rozmezí 0,04 až 0,174 mm (u VVER 1000 jsou tyto vůle 0,1 – 0,48 mm). Jelikož je možné, že po 30 letech provozu může dojít mezi pery a drážkami k určitému opotřebení, a tudíž k nárůstu montážních vůlí, je třeba se touto problematikou zabývat. Na teoretickém řešení se podíleli pracovníci ÚJV Řež, a.s. a ZČU v Plzni. Experimentální práce byly zadány na pracoviště MAT zkušebny Centra výzkumu Řež s.r.o. v Plzni. Výroba polotovarů vzorků s návarem byla realizována ve ŠKODA JS a.s.

The core barrel (hereunder CB) having a wall thickness of approximately 60mm is made of austenitic steel 08Ch18N10T. The tongue of the reactor pressure vessel (hereunder RPV) is made of austenitic steel 08Ch18N10T with cladding made by the use of electrode CN6. Within the design of VVER 440/213 and VVER 1000/320 type reactors, the above mentioned parts form the third pair (see OBR.1), where abrasive wear of contact surfaces may occur as a result of pressure pulsation developed by main coolant pumps. As for Dukovany NPP, limiting clearance values between the RPV tongues and CB grooves were prescribed for assembly and these ranged between 0.04 and 0.174mm (with a VVER 1000 type reactor such clearance values range between 0.1 and 0.48 mm). Whereas after 30 years of operation certain wear may occur between the grooves and tongues resulting in the increase of assembly clearance values, the above described issue shall be dealt with. The theoretical solution was jointly developed by the employees of ÚJV Řež, a.s. and the University of West Bohemia in Plzeň. The experimental work was ordered from the MAT laboratory of the Research Center Rez (Centrum výzkumu Řež s.r.o.) in Plzeň. The production of the sample semi-products with cladding was carried out in ŠKODA JS a.s.

Úvod

Výroba vzorků s návarem byla do ŠKODA JS a.s. (dále jen ŠJS) zadána z důvodu znalostí a zkušeností s výrobou zařízení VVER 440 a 1000 a také z důvodů vlastnictví výrobní konstrukční dokumentace těchto zařízení. Pro získání co nejlepších výsledků zkoušky bylo zadáno vyrobit vzorky se stejných druhů materiálů jaké jsou použity na aktivním zařízení a to včetně tvrdonávaru elektrodou CN6. Právě realizaci tohoto návaru bylo nutno provést technologií aplikovanou při výrobě aktivního zařízení. Pro získání co největšího počtu dat byly vyrobeny 3 vzorky s návarem. Na základě dohody se zákazníkem byla v ŠJS provedena výroba polotovaru vzorků s návarem. Konečné opracování vzorků (reprezentující pero TNR

s návarem) na požadované rozměry potřebné pro provedení experimentu bylo provedeno v ÚJV Řež. V ÚJV Řež byla také provedena výroba vzorků reprezentující drážku Šachty reaktoru – dále jen ŠR). Pro tuto výrobu poskytla ŠJS základní materiál.

Výroba vzorků

Vzorek s návarem reprezentující stranu pera TNR (viz Obr. 2) byl vyroben z materiálu 08Ch18N10T. Požadavky na chem. Rozbor, mechanické vlastnosti a TZ základního materiálu a tvrdonávaru provedeného elektrodou CN6 jsou dány ve výrobní konstrukční dokumentaci – konkrétní hodnoty – viz Tab.1 - 4. Rozměry polotovaru byly navrženy s ohledem na požadavek dodržení přímosti a rovinnosti opracované plochy návaru. Tloušťka provedeného návaru před opracováním byla 8+2 mm (konečný rozměr 6 mm). Po navaření je nutno provést tepelné zpracování pro dosažení požadované tvrdosti návaru (28 – 48 HRC).

Rámcový postup provedení návaru:

Plochu vzorku, na které byl proveden návar, bylo nutno opracovat (obrousit) na čistý kov, očistit, odmastit a provést zkoušku kapilárními metodami.

Polotovary vzorku musí být před navařením opatřeny manipulačními závěsy (přivařenými nebo přišroubovanými) mimo plochu pro návar. Závěsy jsou nezbytné pro manipulaci s navařenými kusy, o teplotě 300 až 350 °C.

Tvrdonávar elektrodou CN-6 je nutno navařovat za předehřevu 300 až 350 °C (navarování bylo provedeno na stole pro el. předehřev s regulací teploty – teplota byla měřena termočlánky (2 ks) umístěnými na navařovaném kusu - u spodní i horní plochy hranolu polotovaru). V průběhu navařování se provádí průběžná kontrola předehřevu. Po celou dobu navařování nesmí teplota navařovaného kusu klesnout pod 300 °C.

Po provedení návaru je nutno, až do provedení tepelného zpracování, udržovat navřené kusy na teplotě 300 – 325 °C ve vyhřáté peci.

Tepelné zpracování musí být provedeno do 8 hodin po ukončení návaru.

Tepelné zpracování při teplotě 850 ÷ 870°C, zajišťující požadované vlastnosti tvrdonávaru, bylo provedeno podle návodky ŠKODA JS, (TEA 500) vypracované pro tepelné zpracování tvrdonávaru navařeného elektrodou CN-6 na materiál 08Ch18N10T.

Postup navařování vzorků vycházel z původní technologické návodky pro navařování vodících per šachty reaktoru VVER 440 a z kvalifikace postupu navařování WPQR VP 548 kvalifikované podle EN ISO 15614-7 a použité pro navařování tvrdonávaru na vymezených vložkách BOT určených pro JEMO. Kvalifikace svářečů pak byla dokladována dle platných předpisů ČR tj. osvědčením o zkoušce dle ČSN EN ISO 9606-1.

Závěr

Vyrobené vzorky (viz Obr. 2) byly předány do ÚJV Řež pro konečné opracování. Konečný tvar vzorku je patrný na Obr. 3.

Tabulky a obrázky

Tab. 1 – Základní materiál 08Ch18N10T [1]

Chemické složení [hm %]:

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	Nb	Co
0,05	1,66	0,52	0,031	0,005	17,5	10,1	0,12	0,09	0,058	0,35	0,07	0,024	0,04

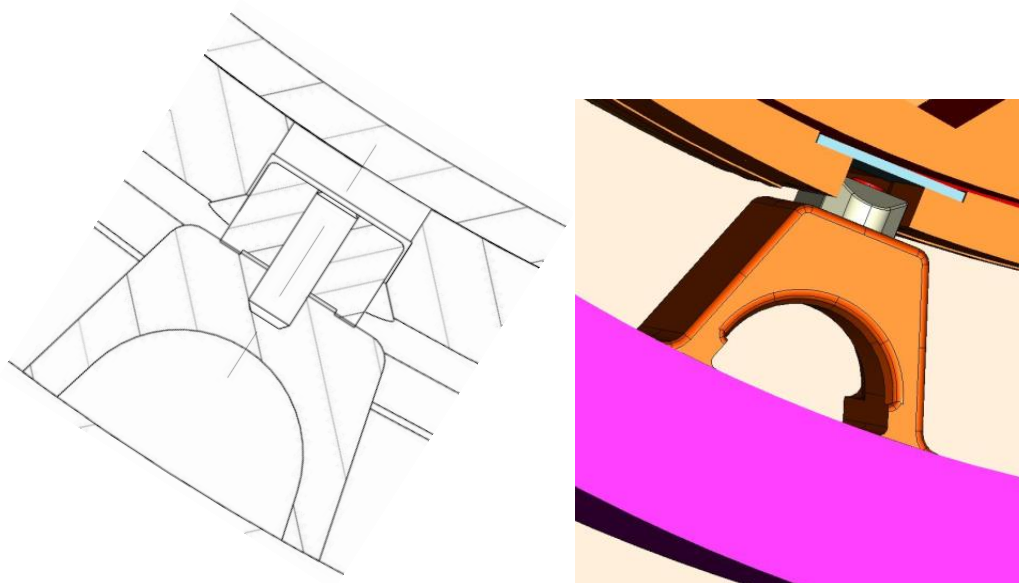
Mechanické vlastnosti [1]

Teplota [°C]	Mez kluzu [MPa]	Pevnost [MPa]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]
20	215	535	61	75
350	259	459	34,5	68
350	253	446	34	68

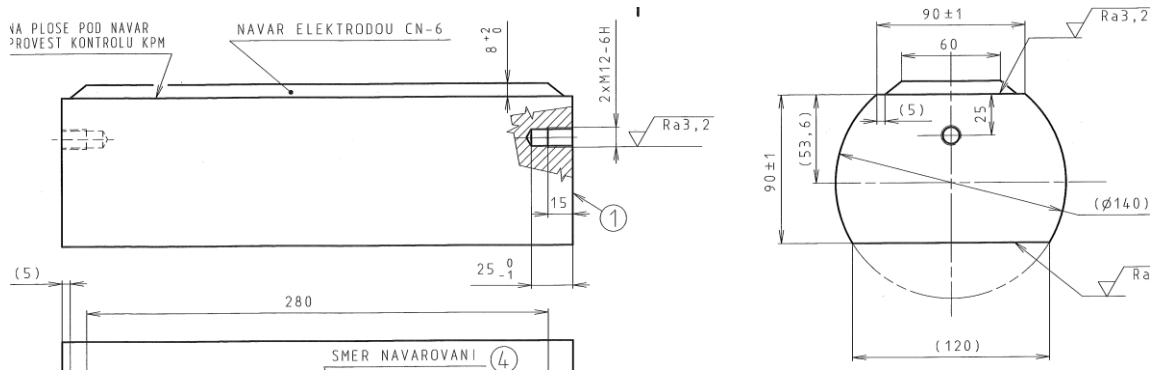
Tab. 2 – Přídavné svařovací materiály

Typ	Obchodní název	Výrobce	Rozměr [mm]	Množství [kg]	Dok. kontroly
elektroda	CN-6*)	ŽAZ Vamberk	4,0	min. 8,1	Tavbový atest ŽAZ Vamberk

*) Elektrody této značky již nelze nakoupit. V ŠJS je zbytek elektrod z roku 1984. Při dodržení režimu sušení $100 \div 150 \text{ °C} / 1 \text{ hod} + 300 \div 320 \text{ °C} / 2 \text{ hod}$ a použití svařovacího proudu $130 \div 140 \text{ A}$ jsou elektrody použitelné. Elektrody jsou dokladované tavbovým atestem výrobce tj. ŽAZ Vamberk.



Obr. 1. : Třecí dvojice – pero TNR a drážka ŠR



Obr. 2. : Vyrobený vzorek s návarem



Obr. 3. : Konečný tvar vzorku s návarem

Literatura

[1] Atest 2012/482 – *Tavba 278075*

ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU

ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING

Pavel Polach^{a)}, Václav Černý^{b)} a Jaroslav Václavík^{a)}

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

^{b)} Doosan Škoda Power s.r.o.

Abstrakt

V příspěvku jsou stručně uvedeny vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ dosažené v roce 2016. Řešení projektu bylo zahájeno v roce 2012, od roku 2016 pokračuje řešení projektu podle jeho aktualizované verze. Řešení projektu bude zakončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu je dlouhodobé zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie.

The paper presents in brief selected results of the Competence Centre Project “Centre of research and experimental development of reliable energy production” achieved in 2016. The project solving started in 2012, since 2016 the project has been solved according to its actualised version. Project solution will finish at the end of 2019. The project main aim is a long-time provision of safe, reliable and economically feasible nuclear and conventional thermal sources of electric power.

1. Úvod

Hlavním cílem projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1], [2], [3], [4] (v rámci programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky) je dlouhodobé zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie. Aplikace výsledků výzkumu a vývoje nových technologií a materiálů přispěje ke zvýšení konkurenceschopnosti výrobců a provozovatelů energetických zařízení.

Řešitelskými pracovišti jsou Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (příjemce projektu), ČEZ, a. s., Doosan Škoda Power s.r.o., Západočeská univerzita v Plzni, České vysoké učení technické v Praze, MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., TES s.r.o. a ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov. Řešení projektu probíhá v rámci tzv. pracovních balíčků [1], [2], [3], [4]. Jejich věcná náplň byla stanovena tak, aby jejich řešením byl splněn hlavní cíl projektu. Aktualizovaná odborná náplň jednotlivých pracovních balíčků, podle které je řešen projekt od roku 2016, byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v témže roce [4].

V roce 2016 mělo být (a bylo) dosaženo podle aktualizované verze řešení projektu celkem 14 výsledků (kromě souhrnné zprávy o řešení projektu):

1. ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín,
2. vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín,
3. metodika stanovování stupně kumulativního poškození materiálů energetických zařízení a jejich zbytkové životnosti při současném působení creepového a únavového degračního procesu,
4. inovovaná metodika pro hodnocení únavové životnosti lopatek parních turbín,
5. metodika modelování vibrací perturovaných olopatkovaných disků,

6. metodika modelování vibrací rotorů generátorů opatřených Lafoonovými zářezy,
7. analýza tlakových polí a silových účinků proudící tekutiny na lopatky oběžného kola parní turbíny,
8. shrnutí výsledků optimalizace depozičních parametrů vybraných materiálů zároveň stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace,
9. shrnutí výsledků zkoušek lomové houževnatosti vybraných ocelí používaných pro výrobu komponent parních turbín,
10. metodika pravděpodobnostního hodnocení spolehlivosti a predikce životnosti parních turbín a dalších energetických zařízení,
11. metodika termovizního měření v systému prediktivní údržby energetických zařízení,
12. metodika měření spektrální emisivity povrchů materiálů energetických zařízení v oblasti pokojových teplot s použitím FTIR infračerveného spektrometru,
13. metodika zkoušení lopatek parních turbín pomocí vyvinutého stacionárního magnetizéru,
14. prototyp stacionárního magnetizéru pro kontrolu lopatek parních turbín s využitím bezdotykové kombinované magnetizace.

V tomto příspěvku jsou stručně uvedeny vybrané (v přehledu první dva) výsledky řešení projektu.

2. Ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín

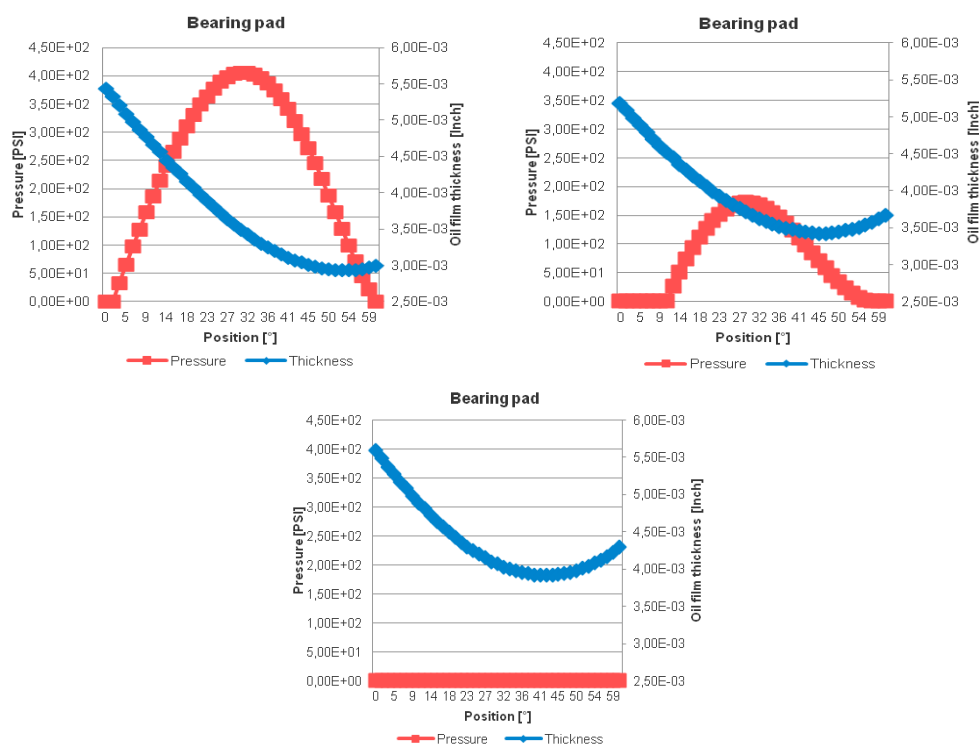
Ve většině turbosoustrojí dodávaných společností Doosan Škoda Power s.r.o. byla používána citrónová radiální kluzná ložiska. V současné době se v konstrukci turbosoustrojí používají převážně radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty s různými počty a s různými pozicemi těchto segmentů. Důvodem je skutečnost, že segmentová ložiska mají v porovnání s citrónovými ložisky mnohem více volitelných geometrických parametrů, což lze s výhodou využít při optimalizaci dynamických vlastností rotorových soustav. Další pozitivní vlastností segmentových ložisek je nemožnost vzniku nestability olejového filmu, která je u ložisek citrónových častým jevem souvisejícím například se změnami rozměrů ložisek způsobených dlouhodobým provozem nebo s odlehčením ložisek vlivem deformace ložiskových podpor či základových desek strojů.

Pro rotory průmyslových parních turbín jsou obvykle používána segmentová ložiska s pěti segmenty v pozici „Load On Pad“ (LOP; tzn. ložisko má jeden segment uložený tak, že jeho osa má stejný směr jako zatížení), protože mají velmi dobré vlastnosti pro potlačení samobuzeného kmitání rotorů způsobeného vlivem proudění páry v ucpávkových partiích průtočných částí těchto strojů. Pro rotorové soustavy strojů větších výkonů, u kterých je nutná přítomnost zvedacího oleje v ložiskách, jsou obvykle používána segmentová ložiska se čtyřmi segmenty v pozici „Load Between Pads“ (LBP; tzn. vektor zatížení ložiska směřuje do mezery mezi dvěma segmenty). V případě identifikace rizika vzniku samobuzeného kmitání rotoru způsobeného prouděním páry v ucpávkových partiích průtočné části příslušného dílu parní turbíny jsou aplikována segmentová ložiska s pěti segmenty v pozici LBP. Segmentová ložiska s pěti segmenty mají pro potlačení touto příčinou vzniklého samobuzeného kmitání vhodnější vlastnosti než segmentová ložiska se čtyřmi segmenty v pozici LBP, protože jejich vlastnosti (tuhosti a útlumy olejového filmu) jsou v horizontálním a vertikálním směru rozdílné, což přispívá k lepší stabilitě rotorů. Tyto rozdíly jsou ještě větší u segmentových ložisek se čtyřmi segmenty v pozici LOP, která však nejsou výrobcem segmentových ložisek standardně dodávána vzhledem k riziku vzniku „flutteru“ horního segmentu. Největší rozdíly

mezi tuhostmi a útlumy v horizontálním a vertikálním směru mají segmentová ložiska se třemi segmenty v pozici LOP.

Byla provedena analýza možností a vhodnosti použití komerčně dostupných softwarových prostředků pro výpočty statických a dynamických charakteristik různých typů radiálních kluzných ložisek. Byly provedeny numerické testy softwarových nástrojů ALP3T, ROMAC, ARMD a TECHLAB (společnost Doosan Škoda Power s.r.o. využívá pro výpočetní analýzu vlastností kluzných ložisek softwarové prostředky ROMAC THPAD, ROMAC MAXBRG a TECHLAB [5]).

Všechny ověřované softwarové prostředky pro výpočty vlastností radiálních kluzných ložisek dávají relativně dobré výsledky a jsou schopny provádět standardní výpočetní analýzu těchto ložisek. Detailnější porovnání výsledků experimentů s výsledky výpočtů ukázalo, že nejvhodnějšími softwarovými nástroji pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín jsou programy ALP3T a ROMAC. Programy ALP3T a ROMAC MAXBRG totiž umožňují velice podrobně modelovat mikrogeometrii ložiska včetně zohlednění provozních deformací jeho jednotlivých segmentů. Dále jsou schopny detailně stanovit energetickou bilanci odvodem tepla olejem i vedením tepla různými částmi ložiska. Umožňují provádět výpočty v oblasti laminárního i turbulentního proudění, uvažovat vliv kavitace, zahrnout vlivy kontaktních tuhostí, jevu „hladovění“ („starvation phenomenon“) a napětí oleje a podchytit různé další speciální efekty. Program ALP3T vykazuje poněkud přesnější výpočty rozložení teplotního pole. Modul TILTBR, jenž je součástí programu ARMD, umožňuje provádět výpočty segmentových ložisek s uvažováním zjednodušené energetické bilance, při které je uvažován odvod tepla pouze přivedeným olejem. Hlavní výhodou tohoto přístupu je rychlost výpočtů.



Obr. 1: Tangenciální profily tlakového pole a tloušťky olejového filmu na segmentu vypočítané softwarem ROMAC MAXBRG: a) bez „starvation“ jevu, b) při částečném „starvation“ jevu, c) s plně rozvinutým „starvation“ jevem (převzato z [5])

„Starvation phenomenon“ je jev, který může nastat u segmentových ložisek v případě, že tato ložiska mají nedostatečný přísun mazacího oleje. Tento jev je přisuzován jednotlivým segmentům ložiska, nikoliv celému ložisku. Na obr. 1 jsou uvedeny charakteristické

tangenciální profily tlakového pole a tloušťky olejového filmu na segmentu při různém stupni výskytu „starvation“ jevu. S narůstajícím vlivem tohoto jevu dochází k poklesu amplitudy tlakového pole a zároveň k posunu jeho počátku od náběžné hrany segmentu směrem k jeho odtokové hraně. Tloušťka olejového filmu naopak postupně narůstá. Přítomnost tohoto jevu na určitých segmentech ložiska může způsobit, že segmentové ložisko má v horizontálním směru tuhosti a útlumy olejového filmu blízké se k nule. Důsledkem této skutečnosti pak rotor osazený těmito ložisky je v horizontálním směru nestabilní a začne při zvyšování úhlové rychlosti rotace v tomto směru kmitat se subsynchronní frekvencí, jejíž hodnota i amplituda jsou závislé na úhlové rychlosti rotace rotoru. K tomuto jevu dochází například u ložisek s velkými radiálními vůlemi či obvodově dlouhými segmenty.

3. Vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín

Problematika torzních vibrací turbín a způsob jejich měření jsou podrobně popsány ve výzkumné zprávě [6]. V její teoretické části jsou analyzovány přístupy k diagnostice torzních vibrací a způsob zpracování dat v časové a ve frekvenční oblasti. V její praktické části jsou uvedeny použité algoritmy pro zpracování a vizualizaci dat a je v ní popsána implementace ukládání a zpracování dat pomocí těchto algoritmů.

Cyklické torzní namáhání rotoru, pokud dosahuje vysokých hodnot, může iniciovat vznik a šíření únavových trhlin. Torzní (smykové) namáhání rotoru může být vyvoláno dvěma způsoby. Prvním způsobem vyvolání torzního namáhání je krut přenášený přes vzduchovou mezeru z generátoru, který má statickou složku odpovídající přenášenému výkonu od turbíny do generátoru a dynamickou složku odpovídající násobkům frekvence sítě při vystavení generátoru přechodovým poruchám v síti. Druhou příčinou vyvolání torzních vibrací je odezva turbíny na toto buzení v jejích jednotlivých částech, jejíž složky odpovídající torzním vlastním frekvencím jednotlivých částí turbogenerátoru.

Torzní kmity rotoru, zejména při přechodových dějích, mohou budit vlastní kmity dalších komponent připojených k rotoru (především oběžných lopatek), které při vysoké úrovni napětí mohou být příčinou jejich poškození. Nejvíce náchylné k poškození jsou dlouhé oběžné lopatky nízkotlakých (NT) stupňů zejména v oblasti jejich uchycení do disků pomocí stromečkových závěsů.

Příčinou vzniku torzních kmitů mohou být následující události:

1. poruchy v elektrické síti (poruchy nebo zkraty, plánované nebo nouzové vypínání a spínání, kontinuální oscilace z důvodu nevyváženosti fází, vibrace způsobené elektronikou nebo občasně vibrace způsobené blízkým provozem oceláren),
2. chyby v zařízení připojeného ke svorkovnici generátoru,
3. provozní důvody (synchronizace generátoru do sítě při najíždění, odpojení od zátěže nebo ztráta synchronizace).

Torzní interakce mohou mít rezonanční nebo přechodový charakter. Přechodové interakce vznikají vlivem poruch v síti, výpadku a následného sepnutí. Vlivem elektromagnetických sil vznikne přechodový torzní ráz, který vybudí všechny přirozené tvary kmitu rotorové soustavy. Torzní odezva rotoru na přechodový děj se projevuje komplexní vlnou obsahující velké množství frekvenčních složek.

Únavové poškození komponent rotující části parní turbíny závisí na velikosti amplitudy smykového napětí. Počet cyklů do poškození lze odhadovat na základě únavové křivky. Nebezpečná je kontaktní únava, při které dochází ke kontaktu rotující části a statoru turbíny. Při existenci kontaktní únavy se mez únavy může snížit až o 70 % z původní hodnoty.

Poškození NT lopatek následkem torzních vibrací nastává zejména rezonanční odezvou od torzních módů, citlivých na vybuzení od negativní sekvence proudů indukovaných v generátoru při nevyváženosti proudů v jednotlivých fázích. Tyto proudy vyvolávají torzní

vibrace při dvojnásobku frekvence elektrické sítě. I když jsou oběžné lopatky obvykle naladěny tak, aby nevykazovaly rezonance v okolí harmonických otáčkové frekvence, frekvence torzní odezvy může být posunuta z důvodu vazby mezi torzními vibracemi rotoru a ohybovými módy lopatek. Pokud mají lopatky v lopatkové řadě ohybové rezonanční frekvence blízké dvojnásobku frekvence elektrické sítě a jejich vibrační módy se navážou na torzní vibrační módy rotoru generátoru a NT stupňů, může být výsledný navázaný mód rezonanční, který je frekvenčně vzdálený od přirozeného ohybového módu lopatek. Lopatky se účastní v torzním módu vibrací navzájem ve fázi. Tento skupinový pohyb se uskutečňuje buď ve fázi s pohybem rotoru na nižší frekvenci než je vibrační mód lopatek nebo v protifázi s pohybem rotoru na vyšší frekvenci než je frekvenční mód lopatek. Odtud vyplývá, že ohybové vibrace lopatek mohou mít příčinu i v proudění páry i v torzních vibracích turbogenerátoru. Vibrace způsobené prouděním páry mají následky podobné pro všechny řady lopatek. Torzní vibrace podporují pouze jednu nebo dvě řady lopatek daného rotoru bez toho, aniž by ovlivnily další, protože tvar kmitu určuje účast dané řady. Pokud tedy dojde k porušení lopatek pouze jedné řady a ostatní řady jsou neporušeny, bývá příčinou většinou torzní vibrační mód.

Oběžné lopatky jsou citlivé na porušení (jak již bylo uvedeno) v místě stromečkových závěsů a i v místě spojení lopatek do svazků. Trhliny se šíří, pokud trhlina zvyšuje lokální napětí nebo snižuje únavovou pevnost v místě trhliny. Například v oblasti paty lopatky je dominantní statická složka napětí, vznikající odstředivou silou.

Na rozdíl od ohybových vibrací turbíny, které upozorňují na problematiku nevyváženosti nebo vyosení rotoru a narůstají během provozu, takže je monitorovací systém schopen sledovat a je možno dostatečně před destruktivním poškozením provést opatření k jejich potlačení, se torzní vibrace vyskytují náhle bez varování.

Přínosem monitorování torzních vibrací je schopnost sledovat akumulaci únavového poškození a schopnost stanovit, zda torzní přechodové děje dosahují takových špičkových hodnot, které jsou schopny způsobit únavové poškození. Dále poskytují personálu elektrárny informaci, že došlo k události, která může mít poškozující účinky, a že je potřeba provést opatření, aby nedošlo k nějakému následnému destruktivnímu poškození.

Klíčovým nástrojem pro přesný torzní monitorovací systém je torzní model turbogenerátoru, prostřednictvím kterého lze stanovit vnitřní napětí a napětí v místě koncentrátorů napětí na základě vstupního měření.

Torzní vibrace jsou nespojitě a většinou nesouvisí s provozem turbogenerátoru. Napětí spojené s torzními vibracemi je většinou přípustné, pokud frekvence vibrací nejsou blízké rezonanční frekvenci nebo pokud amplitudy vibrací nedosahují extrémních hodnot. Mechanismem poškození je většinou vysokocyklová únava akumulací poškozujících cyklů od přechodových dějů.

Monitorovaná data se zpracovávají v časové a ve frekvenční oblasti.

Předpokládá se, že torzní vibrace jsou určovány ze zákmitů krouticího momentu prostřednictvím zkosu rotoru (nebo smykového napětí) měřením na povrch rotoru nalepenými odporovými tenzometry. Torzní vibrace mohou být dále určovány ze zkrutu rotoru měřením rozdílu natočení ve dvou řezech. Třetím možným způsobem měření torzních vibrací je měření derivace úhlového vychylky rotoru v jednom místě (princip tachometru).

Ke zpracování torzních vibrací byl vytvořen vlastní program v systému MATLAB. Program je modifikován pro načítání hodinových záznamů, ukládaných z digitálních dat, přenášených po rozhraní ethernet. Program zpracovává data uložená z digitálního výstupu měřicí jednotky v hodinových souborech a z těchto dat vytváří denní reporty, obsahující základní statistiky z časové oblasti, amplitudová spektra a spektrogramy pro rozsah osy

frekvencí 0 až 200 Hz a 160 až 190 Hz (z důvodu vazby na rezonanční frekvence NT lopatek). Program dále „hlídá“ výskyt přechodových dějů na základě překročení střední hodnoty torzních vibrací o danou, předem nastavitelnou, mez.

Pro další zpracování a redukci naměřených dat bylo navrženo programové rozhraní v systému MATLAB:

1. data jsou segmentována do úseků po 10 sekundách (segment obsahuje při vzorkovací frekvenci 3 kHz 30 000 vzorků),
2. z každého segmentu je vyhodnocena jedna hodnota statistických parametrů: střední hodnota, maximum, minimum, RMS – standardní odchylka, šikmost, špičatost a kurtosis (získá se sedm redukováných průběhů statistik),
3. z důvodu zachování plné informace o časovém průběhu je každou hodinu ukládán jeden neredukovaný průběh o délce 10 sekund,
4. při výskytu torzního přechodového děje je zachován neredukovaný celý děj,
5. z celodenního průběhu je počítán dvouparametrický histogram četnosti amplitud a středních hodnot metodou „rainflow“ a ukládán do textového souboru; každý den je připojována nová matice na konec souboru, ze kterého je možné vytvořit kumulativní matici za jakékoliv období,
6. pro celodenní soubory a pro nestandardní přechodové jevy je proveden výpočet spektrogramu,
7. pro data zpracovaná ve frekvenční oblasti je navrhován softwarový prostředek pro hledání amplitud určených frekvencí a jejich posun ve sledovaných pásmech.

Dalším cílem diagnostiky torzních vibrací je odhad poškození oběžných turbínových lopatek na základě trendů v amplitudovém spektru; tato diagnostika je zatím ve stádiu vývoje.

4. Závěr

V příspěvku je uveden výčet výsledků řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci vznikl i tento příspěvek) dosažených v roce 2016 a dva z nich jsou stručně představeny (ověření vhodných softwarových nástrojů pro výpočty statických a dynamických vlastností radiálních kluzných ložisek parních turbín a vyvinutí algoritmů pro měřicí systém torzních vibrací turbín).

Na rok 2017 je plánováno dosažení 10 výsledků řešení projektu.

Literatura

- [1] (2012): *Přihláška projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ do programu Technologické agentury ČR na podporu rozvoje dlouhodobé spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích mezi veřejným a soukromým sektorem „Centra kompetence“, doba řešení: 03/2012 – 12/2019.* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [2] (2015): *Přihláška projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ do programu Technologické agentury ČR na podporu dlouhodobé spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích mezi veřejným a soukromým sektorem Centra kompetence, doba řešení: 01/2016 – 12/2019.* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [3] Polach, P. (2012): *Energetické centrum kompetence, sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] Polach, P. (2016): *Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu, sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] Černý, V. (2016): *SW prostředky pro výpočty vlastností radiálních kluzných ložisek, výzkumná zpráva VZTP-1114.* Plzeň: Doosan Škoda Power s.r.o.
- [6] Václavík, J. (2016): *Procedury pro diagnostiku torzních vibrací na rotoru turbogenerátoru, výzkumná zpráva VYZ-VZ-54/16/03,* Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI KOMPONENT UHELNÝCH ELEKTRÁREN A SPALOVEN UŽITÍM NiCr TERMÁLNÍCH METALICKÝCH NÁSTŘIKŮ

ENHANCING THE LIFE OF COMPONENTS OF COAL-FIRED POWER PLANTS AND WASTE INCINERATORS USING THERMAL METALLIC NiCr SPRAYS

Jiří Janovec, Jakub Horváth a Michal Junek

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

Abstrakt

Experimentální hodnocení kvality NiCr a NiCrMoW termálních metalických povlaků IGS 5-450 a 5-470 bylo provedeno na nově vytvořených povlacích bez provozního zatížení. Kvalitu byla hodnocena dle homogenity, tvrdosti a tloušťky vrstvy, třecí odolnosti a odolnosti při vnikací (indentační) a vrypové zkoušce. Dále dle mikrostrukturální a mikrochemické homogenity povlaku, schopnosti vytvoření kompaktních pasivačních bariér, zabránění propustnosti povlaku a tím zabránění koroznímu rozpouštění povlaku a sulfataci podkladové oceli. Výsledky byly porovnány se studií EPRI, hodnotící žárové nástřiky na kotelních membránových stěnách po 38.000 hodinách provozu v uhelné elektrárně Duke Energy. Naše výsledky ukázaly, že aplikace nástřiku MetalSpray (Smartarc) při použití nástřiku IGS 5-450 vede k prodloužení životnosti kotelních komponent, pracujících v teplotním intervalu 315 až 480 °C i aplikačním možnostem nástřiku 5-570 v prostředí spaloven.

Experimental quality assessment of NiCr and NiCrMoW thermal metal coatings IGS 5-450 and 5-470 was performed on newly created coatings without operating load. The quality was evaluated according to the homogeneity, hardness and thickness of the layer, frictional resistance and resistance in the indentation and scratch test. Furthermore, according to the microstructural and microchemical homogeneity of the coating, the ability to create compact passivation barriers, to prevent the permeability of the coating and thus to prevent the corrosive dissolution of the coating and the sulphation of the underlying steel. The results were compared with an EPRI study evaluating thermal metallic sprays on boiler membrane walls after 38,000 hours of operation at the Duke Energy coal power plant. Our results have shown that MetalSpray (Smartarc) application with IGS 5-450 spraying leads to extended lifetime of boiler components operating in the temperature range of 315 to 480 °C and application rates of 5 - 570 spraying in incinerator environments.

Úvod

Kvalita NiCr žárových nástřiků byla hodnocena v laboratořích EPRI (Electric Power Research Institute, USA) v r. 2009. Byly porovnány 3 nástřiky IGS (Integrated Global Services) nanášeného technologií MetalSprayTM a to 5-601, 5-450 a 2-200. Dále 4 variace nástřiků AMSTAR a to 649, 888/644, 888 a 888-tlustý. Hodnoceny byly korozní úbytky na kotelních membránových stěnách po 38.000 hodinách provozu v uhelné elektrárně Duke Energy [1].

Výsledky exponovaných nástřiků ukázaly, že nástřik IGS 5-450 je z uvedených nástřiků korozně i mechanicky nejodolnější, po uvedeném provozu zůstal prakticky neporušený.

V letech 2009 až 2016 byl tento nástřik aplikován na řadě uhelných elektráren a spaloven v USA, Japonsku, Indii a v Evropě. Podstata odolnosti proti sulfataci takto aplikovaného žárového nástřiku na podkladové feriticko perlitické žárovevné oceli byla popsána v publikaci [2].

Vzhledem k agresivnějšímu prostředí spaloven byl nově vyvinut žárový nástřík IGS 5-470, který lze charakterizovat jako žárový nástřík NiCrMoW. Ten především díky vyššímu obsahu Mo má výrazně vyšší ekvivalent PRE odolnosti pittingové – bodové korozi proti Cl aniontům. Legující prvky jako jsou uvedené Mo, W a případně Ti nemohou tvořit pasivační filmy typu Cr₂O₃. Tyto prvky vytváří především intermetalické fáze, či karbidy, vedoucí ke zvýšení žárovečnosti a erozivní odolnosti povlaků.

Provedené experimentální zkoušky

Na kvalitu povlaku bylo usuzováno dle homogenity, tvrdosti a tloušťky vrstvy, třecí odolnosti a odolnosti při vnikací (indentační) a vrypové zkoušce. Dále dle mikrostrukturální a mikrochemické homogenity povlaku, schopnosti vytvoření kompaktních pasivačních bariér, zabránění propustnosti povlaku a tím zabránění koroznímu rozpouštění povlaku a sulfataci podkladové oceli

Dodaný stav vzorků dokumentuje obr. č. 1 (vzorky č. 5-450). Každá sada vzorků 1 x 3“ byla rozdělena na dvě položky. Ve vrchní části obrázků je zalito v dentacrylu pro mikrostrukturální a mikrochemické hodnocení 6 kusů příčných řezů. Metalografické vzorky měly označení čísla 1 až 6. Pod nimi je uloženo 5 kusů modře zbarvených a lakem ochráněných vzorků pro hodnocení kvality přilnavosti nástříku.

Z naměřených hodnot tloušťky nástříku (obr. č. 2) je patrná její rovnoměrnost, při výrobě nástříků v automatu. Ta se pohybuje mezi 0,56 až 0,60 mm. Byla srovnatelná pro oba hodnocené druhy.

Z obrázku č. 3 je patrné, že nástřík vzorku 5-450 vytváří pásové uspořádání oddělené interlamelárními zřejmě zoxidovanými filmy oxidu chromitého. Ten chrání oblasti se zvýšenou koncentrací niklu proti sulfataci. Nástříkovou technologií “Smartarc“ je navíc dosaženo vhodného rozložení mezioxidických kanálek, neboť tyto nejsou propojeny a tím je zabráněno propustnosti povlaku a následné sulfataci podkladové oceli.

Z obr. č. 4 a 5, dokumentujících rozhraní mezi základní ocelí a žárovým nástříkem obou nástříků, je patrný mechanismus vzniku přilnavosti k základnímu materiálu, tj. kvalita adheze nástříku k podkladu. Dochází k lokálnímu natavení povrchu podkladové oceli a vlivem rozdílných hodnot součinitelů tepelné roztažnosti mezi nástříkem a uhlíkovou ocelí i k plastické deformaci povrchu méně pevné oceli. Plastickou deformaci povrchu podkladu ovlivňuje i přechod korundové otryskávání.

Mezi podkladovou feriticko perlitickou ocelí a NiCr nástříkem nevzniká difuzní mezivrstva. Na rozhraní není patrný ani pozvolný mikrostrukturální gradient, změna struktury probíhá skokem. Přitom strukturální přechod u obou nástříků je velmi podobný. U obou druhů nástříků se objevují v oblasti adhezního spoje částicové či plenovité lamelární oxidy, později identifikované jako oxidy hliníku a křemíku.

Tvrdosti a průběhy mikrotvrdostí přes rozhraní žárových nástříků byly měřeny v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 na kalibrovaném stacionárním mikrotvrdoměru LECO M-400-G1 metodou dle Vickerse zatížením 1 kg (HV1) a 100 g (HV0,1). Naměřené výsledky, dokumentované např. grafem na obr. č. 6 ukázaly, že střední hodnoty HV0,1 jsou u povrchového nástříku vzorků 5-470 o cca 200 HV vyšší, než u nástříku 5-450.

Zkouška adheze a dalších módů porušení nástříku byla provedena scratchtestem na instrumentu CSM Revetest Xpress při nárůstu zatížení (progressive load test) 1-100N, rychlostí 10mm/min, hrot Rockwell r=200nm dle doporučení EN 1071 – 3. Obr. 7 dokládá, že módy porušení nástříku 5450 jsou rovnoměrnější. Ani u jednoho z nástříků, vzhledem k jejich tloušťkám se nepodařilo stanovit nejvyšší kritickou sílu (HLc) pro adhezní odtržení vrstvy.

Indentační zkouška kvality nástřiku byla provedena Mercedes testem v návaznosti na Rockwellovu zkoušku při předtížení 98,1N s dotížením na 1471N dle ČSN EN ISO 6508-1. Charakteristické módy porušení okolí Rockwellova vtisku pro nástřik 5-470 dokládá obr. č. 8.

Tribologická zkouška byla provedena metodou pin-on disku Tribometrem THT CSM+ instruments v návaznosti na DIN 50 324 a ASTM G 99 - 95a. Kluzné opotřebení bylo hodnoceno na rádius stopy 4 mm při zátěžné síle 5N 4000 otáček a při F=10N 6000 otáček. Vyhodnocovány byly lineární rozměry drážky a kontrolovány rozměry kuličky, $r = 6$ mm. Objemové a hmotnostní úbytky nebyly stanoveny. Výsledky dokumentuje např. obr. č. 9. Součástí tribologické zkoušky bylo i vyhodnocení dynamického součinitele tření. Výsledky doložily, že odolnost proti opotřebení je u obou druhů nástřiků 5-470 a 5-450 srovnatelná, nižší šířku třecích drážek vykazoval tvrdší nástřik 5-470. Opotřebení kuličky bylo zanedbatelné, výsledné opotřebení drážky je opotřebením nástřiku.

Pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 5410 s EDS analyzátozem byla posuzována jemnozrnnost nástřiků a jejich nepropustnost s ohledem na formaci zúžených kanálků v interlamelárních oxidech chrómu. Po mikrostrukturální analýze pokračovala lokální a následně i liniová chemická EDS analýza všech vzorků obou druhů nástřiků. Vzhledem k limitovanému rozsahu tohoto příspěvku budou některé z výsledků [3] ukázány při ústní prezentaci.

Závěry

Experimentální hodnocení kvality termálních metalických povlaků IGS bylo provedeno na nástřicích 5-470 a 5-450. Hodnoceny byly pouze nově vytvořené povlaky bez provozního zatížení.

Výsledky potvrdily, že mikrostrukturální a mikrochemické vlastnosti nového nástřiku IGS 5-450 jsou zcela ekvivalentní experimentálním výsledkům, získaných v EPRI na exponovaných vzorcích. Je zřejmé, že aplikace uvedené technologie Smartarc při použití nástřiku IGS 5-450 vede k prodloužení životnosti kotelních komponent, pracujících v teplotním intervalu 315 až 480 °C.

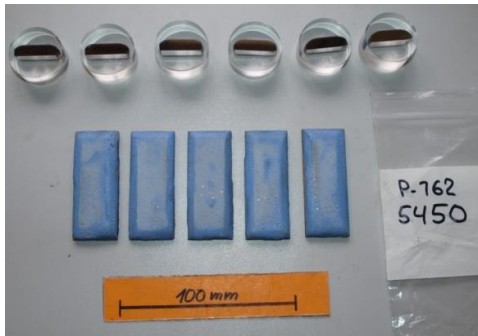
Chemické složení uvedených termálních nástřiků je srovnatelné s chemickým složením Ni slitin typu Inconel a Incoloy, superslitin, používaných v potrubních systémech či nádobách v ropném, případně v chemickém průmyslu na běžné průmyslové louhy a kyseliny např. při skladování ropy či při výrobě chemických hnojiv. Vzhledem k mechanickým vlastnostem žárových povlaků a vyšší teplotní stabilitě je možné jimi nahrazovat plastové či pryžové povlaky. V současnosti lze očekávat příslušné reference z reálných provozů, či experimentální hodnocení svědečných vzorků z těchto aplikací.

Poděkování

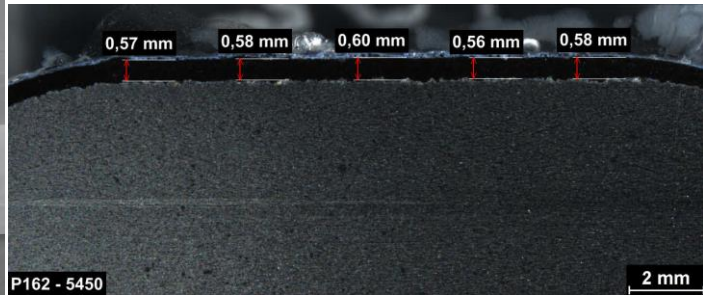
Tento příspěvek vznikl za podpory MPO ČR v rámci řešení projektu č. LO1207 programu NPU1.

Literatura

- [1] CARDOSO, S., GINN, D.: *EPRI Waterwall samples Analysis, Memorandum*, 10/20/2009.
- [2] HALL, I., SPALENKA, D.: *NiCr povlaky na nižších úrovních spalovací komory (agresivní prostředí síry a vanadu)*, All for Power, pp. 54-57, 2016
- [3] JANOVEC, J., JUNEK, M., HORVÁTH, J.: *Kvalita nástřikové vrstvy IGS a její použití na energetických jednotkách*, Energetika Most 2017, Řež



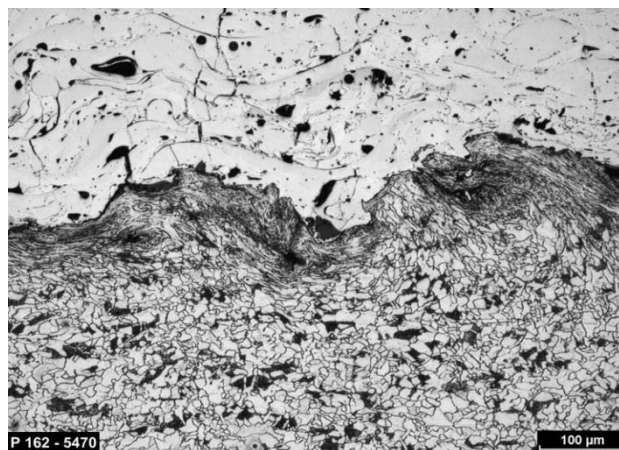
Obr. 1 Vzorok P 762 5450



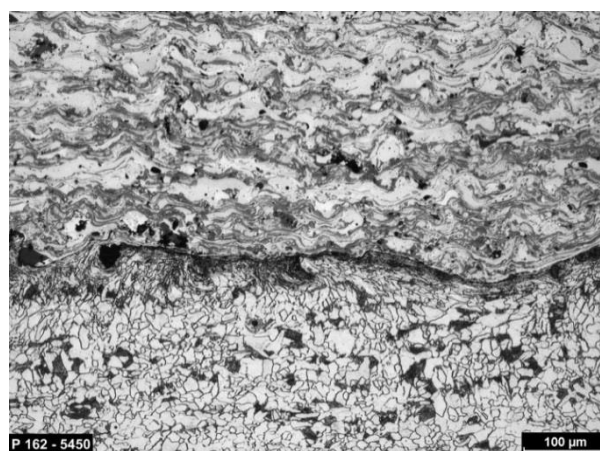
Obr. 2 Tloušťka nástřiku 5-450



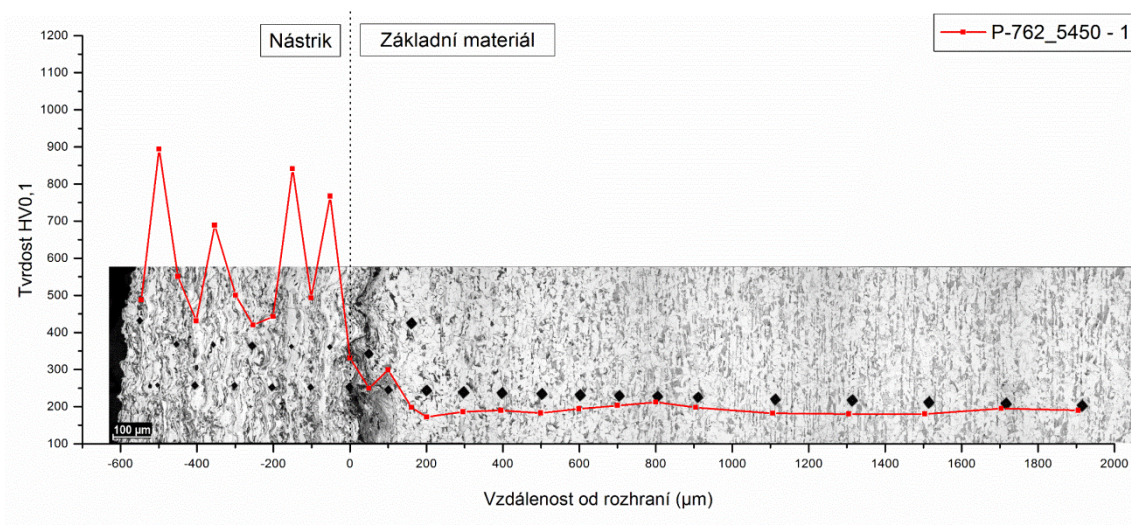
Obr. 3 Makrostrukturální pohled na nástřik a jeho rozhraní



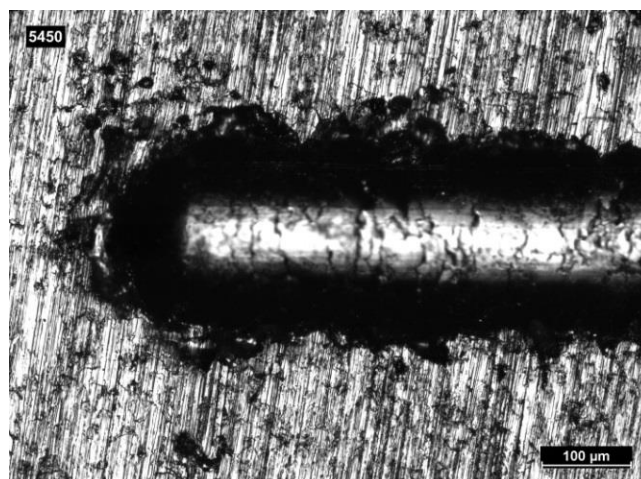
Obr. 4 Mikrostruktura nástřiku 5-470



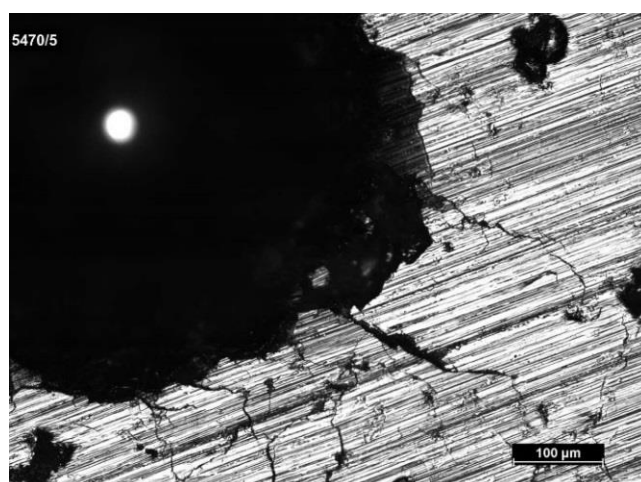
Obr. 5 Mikrostruktura nástřiku 5-450



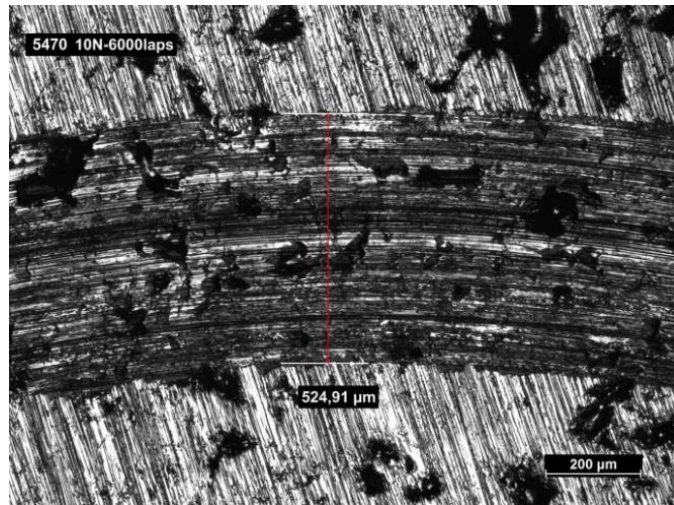
Obr. 6 Průběh mikrotvrdości HV0,1



Obr. 7 Scratchtest nástriku 5-450



Obr. 8 Detail okolí vtisku 5-470



Obr. 9 Opotřebení po 5470 10N a 8000 ot

POUŽITÍ PLÁTOVANÝCH TRUBEK NA KRITICKÁ MÍSTA KOTLŮ PRO ENERGETIKU

THE CLADDING TUBES FOR THE ENERGETIC BOILER CRITICAL PARTHS APPLICATION

Ladislav Horváth^{a)}, Jakub Horváth^{a,b)}, Jiří Janovec^{b)}

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

^{b)} ČVUT, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

Abstrakt

Příspěvek uvádí do problému aplikace plátovaných trubek pro specifická degradační prostředí. Uvádí možnosti rozšíření použití plátovaných trubek pro aplikaci v energetice. V případě energetických bloků je nutné brát v úvahu teplotní zatížení při provozu, které může způsobit vážné problémy na plátovaném rozhraní. Příspěvek uvádí výpočtové řešení na plátovaném rozhraní nosného a ochranného materiálu.

Introduction of this paper briefly introduce into application of the cladding tubes under specific degradation conditions. One of the specific applications of cladding tubes can be for power boilers, respectively for heat exposed boiler parts. It is necessary keep in mind heat exposition in this application. Elevated temperature can cause serious problems for cladding surface. This paper present results of the cladding surface numerical modeling.

Úvod

Studie proveditelnosti nadkritických kotlů pro energetiku se objevily v první polovině padesátých let minulého století. Motivace, která spočívala ve zvýšení účinnosti nad 40% při zvýšení tlaku páry nad 22,1MPa a její teploty nad 374,15°C byla na dlouhá léta zbrzděna nejdříve tím, že nebyly k dispozici ocele schopné dlouhodobě odolávat těmto podmínkám a později ekonomickou nevýhodností, na které se podílela rozhodující měrou cena nových vysoce legovaných ocelí. Oceli, u kterých jejich výrobci deklarovali použitelnost a dlouhodobou odolnost (korozní i creepovou) se postupně objevovaly na trhu a nadkritické a později i ultrakritické bloky se začaly po světě stavět a provozovat. Reálný život postupně ukazuje, že očekávání spojená s modifikovanými materiály (9-12 %Cr) s feriticko-martensitickou strukturou a později s komplexně legovanými austenitickými žárovevními ocelmi byla v řadě případů příliš optimistická. K tomuto poznání se dopracovala např. již před více než patnácti lety japonská energetická společnost Tokyo Electric Power, která pro elektrárnu Isogo 600 MW (parametry ostré páry 250bar/600°C/610°C) použila pro přehříváky materiál Inconel 718 (50-55%Ni, 17-21%Cr). Cena za získání dlouhodobé spolehlivosti použitím niklových slitin je však vysoká. V [1] byla publikována cena materiálu ve vztahu k velikosti meze kluzu, která pro řadu ocelí od AISI 316L po Inconel 625 roste prakticky exponenciálně. Použití plátovaných trubek v energetice je jednou z možných ekonomicky zajímavých variant konstrukčních řešení.

Výroba plátovaných trubek a jejich použití na tlakové systémy

V našem příspěvku se z celé řady technologií výrob plátovaných trubek zaměříme na trubky, u kterých dochází při výrobě k metalurgickému spojení. Protože se obvykle jedná o materiály rozdílného chemického složení, vzniká v místě spojení vrstva přechodového kovu, který často podmiňuje výsledné možnosti celé trubky. Při provozování za vysokých teplot dochází na rozhraní kovů k difuzním procesům, které mohou postupně měnit vlastnosti přechodové vrstvy.

Tato problematika je pro řadu kombinací materiálů poměrně podrobně řešena a plátované trubky jsou již na trhu dostupné [2], [3]. Zatím největší rozšíření našly v oblastech, kde

provozní podmínky nejsou příliš náročné a plátování má význam spíše jako protikorozní ochrana. U materiálových kombinací, kterými jsme se v posledních letech zabývali, se předpokládá použití pro vysoké teploty a tlaky, konkrétně pro teplosměnné plochy trubkových přehříváků a přihříváků. Naše pozornost byla hlavně zaměřena na zvládnutí ohybů těchto trubek. Důvod pro toto zaměření byl v tom, že prakticky stejným technologickým postupem, jakým jsou vyráběny rovné trubky (délka u předních výrobců přesahuje 12m) je možné vyrábět i ohyby a kolena. Pro každou geometrii je však nutné mít k dispozici samostatný stroj což velmi redukuje nabízený sortiment.

Vliv tloušťek základního materiálu a plátované vrstvy

Tloušťka plátované vrstvy byla ve většině případů odvozena od použité technologie plátování a nebyla obvykle nižší než 3mm. Nyní je možné nalézt plátované trubky s plátovanou vrstvou výrazně nižší. I v případě, že pevnostní návrh uvažuje pouze tloušťky a vlastnosti nosného kovu a vlastnosti druhého (ochranného) kovu zanedbává, nemusí být návrh na straně bezpečnosti. Kromě toho je u silnějších vrstev ochranného kovu tento postup silně neekonomický [4]. U plátovaných trubek, které mají pracovat při vysokých teplotách, jsou limitující napět'ové poměry na styku základního a naplátovaného kovu. V případě oddělení obou kovů na jejich styku se zásadně změní napět'ové poměry v celé stěně.

Porovnání základních možných variant

Pro ukázkou jsme zvolili jako základní trubku o \varnothing DE 40mm, tloušťce stěny 6mm, která opatřena plátovanou vrstvou z vnitřní strany o tloušťce 0,5 a 2,5mm nebo o tloušťce 0,5 a 2mm z vnější strany. Základní trubka je z oceli P92. Ocel P92 (ASTM A335 P92, X10CrWMoVNb 9 - 2) je martenzitická ocel s 9 % Cr koncipována pro využití v energetických zařízeních s nadkritickými parametry páry. Jako naplátovaný ochranný materiál je použita v obou případech niklová slitina a to Sanicro 60 (INCONEL 625, ALLOY 625, W. Nr. 2.4856) a Sanicro 28 (ALLOY 28, W. Nr. 1.4563), Výpočtově byly porovnávány stavy zatížení vnitřním přetlakem a teplotou (dva stavy $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=0,6\text{ MPa}$ a $t=580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=22\text{ MPa}$) a zatížení pouze teplotou a pouze vnitřním přetlakem.

Byly zvoleny dvě niklové slitiny s rozdílnou tepelnou roztažností, z nichž se tepelná roztažnost pro hodnocené teploty se pro Sanicro 60 blíží roztažnosti oceli P92 a roztažnost Sanicro 28 je výrazně vyšší.

Výsledky výpočtového hodnocení

Provedené hodnocení napět'ových stavů dokládá pro aplikace plátovaných trubek při vyšších teplotách rozhodující vliv rozdílů v teplotní roztažnosti. Nárůsty napětí na styku obou kovů při vyšších rozdílech tepelné roztažnosti, které se pohybují ve stovkách procent, tyto kombinace zcela vylučují (obr.1). Pro tyto aplikace se ukazuje jako výhodnější použití tenkých plátovaných vrstev, které budou plnit pouze funkci ochrany základního kovu. Trubkové přehříváky a přihříváky sestávají nejen z rovných úseků, ale i z ohybů. Provádění trubkových ohybů plátovaných trubek (ať již za studena bez následného tepelného zpracování, nebo s pomocí indukčního ohřevu) je vždy spojeno s velkou plastickou deformací v tažené i tlačené části ohybu a vnesením zbytkového napětí. S ohýbáním je spojena i možnost vzniku lokálních nespojitostí na styku základního a plátovaného kovu. Problematikou predikce možnosti vzniku nespojitosti na styku základního a plátovaného kovu při ohybu se zabývaly práce shrnuté v [5] v rámci kterých byla i vytvořena a prakticky odzkoušena výpočtově experimentální metodika predikce úspěšnosti provedení ohybu plátované trubky. Pro praktické aplikace bude zřejmě nezbytná 100% NDT kontrola. Při delaminaci vrstev jsou špičky napětí natolik vysoké, že mohou způsobit zip efekt (obr. 2), což je stav, kdy dochází k rychlému nárůstu plochy nespojitosti, nebo drobná lokální nespojitost přejde do vzniku a rozvoje trhliny, která se následně šíří základním materiálem.

I přes uvedené problémy a odlišnosti od homogenních materiálů je použití zejména plátovaných trubek v energetice perspektivní.

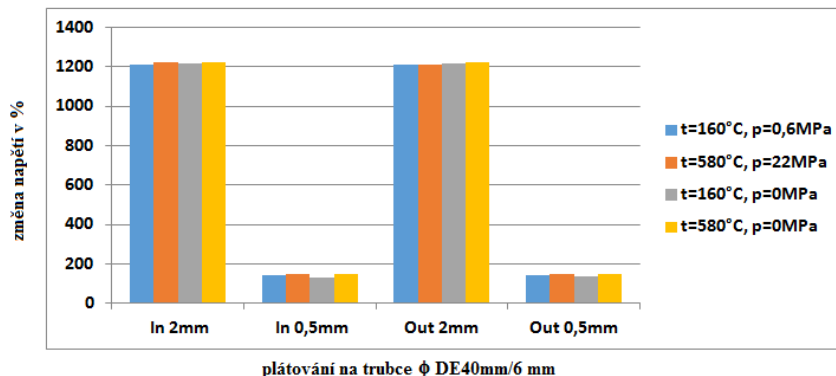
Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory TA ČR v rámci řešení projektu č. TA03010150 programu ALFA3 a za podpory MPO ČR v rámci řešení projektu č. LO1207 programu NPU1.

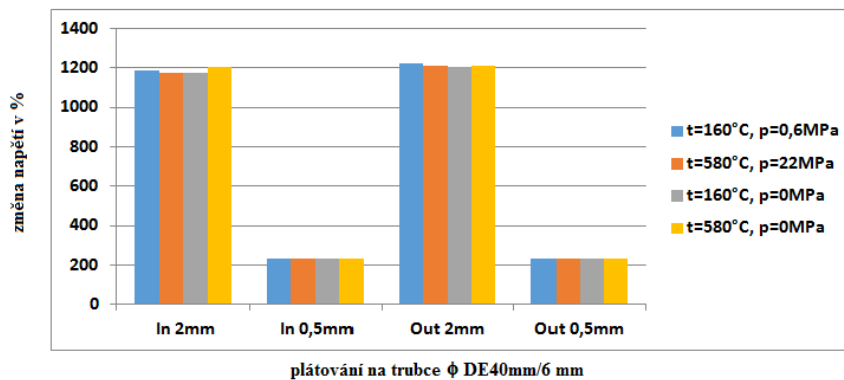
Literatura

- [1] BERG, B., SCHNAUT, U. (2009): *A new production method for CRA Lined Steel Pipe based on sheet metal*. In: 4 th Pipeline Technology Conference 2009. Hannover, Germany.
- [2] [Clad Pipe Companies. Company-list.org \[online\]. 2017 \[cit. 2017-08-24\]. Dostupné z: http://www.company-list.org/products/clad_pipe.html](http://www.company-list.org/products/clad_pipe.html)
- [3] [List of Clad Pipe Companies. Listofcompaniesin \[online\]. 2017 \[cit. 2017-08-24\]. Dostupné z: http://www.listofcompaniesin.com/product-s/clad-pipe/2.html](http://www.listofcompaniesin.com/product-s/clad-pipe/2.html)
- [4] JANOVEC, J., HORVÁTH, J. (2016): *Použití plátovaných trubek pro tlaková zařízení*. In: *Tlak 2016*. Líbeznice: Medim, s. 55-62. ISBN 978-80-87140-41-3.
- [5] HORVÁTH, L., SVOBODOVÁ, M., HORVÁTH, J., JUNEK, M. (prosinec 2016): *Závěrečná zpráva k projektu „Výzkum vlastností a chování tlustostěnných plátovaných trubkových ohybů v podmínkách ekonomicky významných aplikací, včetně zvládnutí jejich výroby ověřené certifikovaným orgánem s evropskou působností“*, Program TA ČR ALFA3, Zpráva UJP 1749

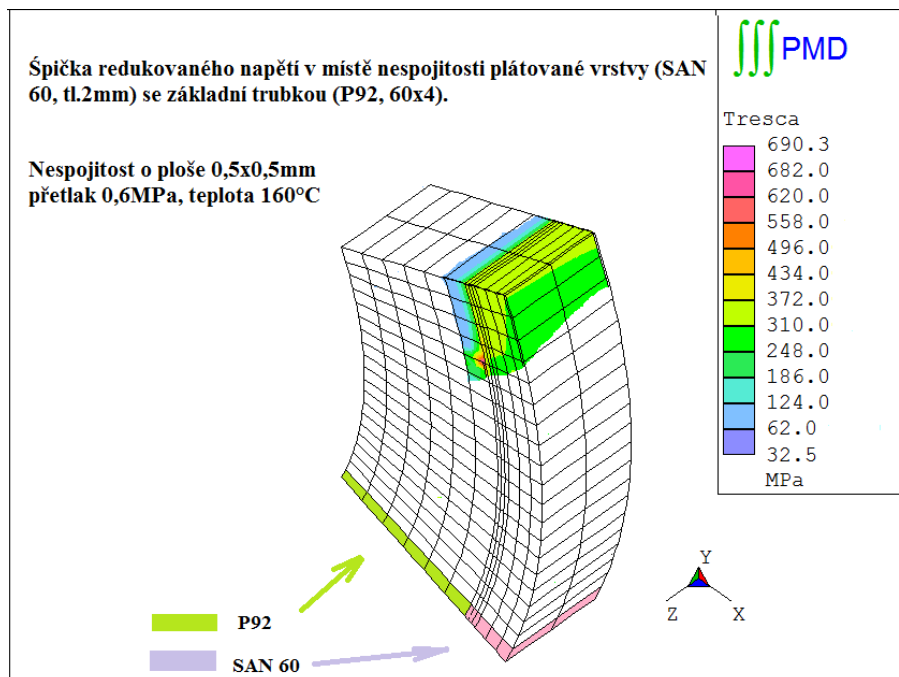
Procentuální změna napětí σ_{zz} na styku ocele P92 a plátované vrstvy při požití niklové slitiny SAN 28 místo SAN 60



Procentuální změna redukovaného napětí HMH na styku ocele P92 a plátované vrstvy při požití niklové slitiny SAN 28 místo SAN 60



Obr. 1 Zásadní vliv teplotní roztažnosti na napětí ve styku kovů



Obr. 2 Koncentrace napětí v místě nespojitosti

ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPONENT V PROVOZU POMOCÍ MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES COMPONENT IN OPERATION USING SUB-SIZED SPECIMENS

Eva Chvostová, Ján Džugan a Pavel Konopík

COMTES FHT a.s., Dobřany

Abstrakt

Degradace mechanických vlastností kovových materiálů může vést ke ztrátě spolehlivosti a bezpečnosti strojů a kovových konstrukcí v elektrárnách při jejich provozu. Pro stanovení aktuálních materiálových vlastností je možné použít nedestruktivní techniky odběru vzorku a s pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních těles (např. mikro-tahová zkouška, únava miniaturních těles, zkoušky mini-Charpy pro určení přechodové teploty FATT) predikovat zbytkovou životnost komponent. Použitá metoda miniaturizovaných standardních zkušebních těles respektuje stejný mód zatížení jako v případě standardních vzorků a není nutné předem stanovit korelace.

V článku je popsána použitelnost a spolehlivost těchto zkušebních metod pro stanovení aktuálních mechanických vlastností komponent v provozu na materiálech používaných v energetice.

The degradation of mechanical properties of metallic materials can lead to loss of reliability and safety of machines and metal structures in power plants during their operation. Nondestructive sampling techniques can be used to predict the residual life of the components and using miniaturized standard test specimens (e.g. micro tensile test, miniature fatigue test, determining the transition temperature FATT) to determine actual material properties. The method used for miniaturized standard test specimens respects the same load mode as for standard samples and no correlation is required.

This article describes the usability and reliability of these test methods for determining the actual mechanical properties of components in service on materials used in power engineering.

Úvod

Tento příspěvek představuje potenciál aplikace miniaturizovaných vzorků pro určení mechanických vlastností materiálů. Cílem použití těchto metod je určení lokálních mechanických vlastností a vlastností materiálu v případech, kdy je k dispozici omezený objem experimentálního materiálu (např. při vývoji nano-materiálů metodami extrémní deformace, vývoj speciálních mechanicko-tepelných zpracování pomocí fyzikálního simulátoru, atd.). Tyto metody lze použít i při odběru vzorku semidestruktivním odběrem pro vyhodnocení zbytkové životnosti, Proto je vývoj metodiky zkoušení mechanických vlastností materiálů pomocí miniaturizovaných standardních zkušebních vzorků důležitý, protože tyto zkoušky mají velmi důležitou výhodu – používá se při nich stejný režim zatížení jako u standardních zkušebních těles [1]. V článku je prezentováno několik vybraných zkoušek pro vyhodnocení mechanických vlastností pomocí mini-vzorků.

Mikro-tahová zkouška (M-TT)

Pro určení tahových vlastností kovových materiálů při současném zachování výhody spotřeby velmi malého množství experimentálního materiálu byla navržena geometrie pro mikro-tahové těleso, viz Obr. a. Srovnání výsledných křivek ze zkoušky tahem na standardních a mikro-tahových tělesech je graficky vyobrazeno na Obr. b. Pro takový typ

tělesa bylo nutné navrhnout čelisti pro uchycení do univerzálního zkušebního stroje, viz Obr. c. Měření deformace probíhá pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, který využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation - DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce. Na zkoušený vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech [1].

Určení lomové houževnatosti pomocí vzorků mini-Charpy

Lomová mechanika má v současné době velký význam zejména při stanovení mezního zatížení při posuzování integrity komponent v provozu nebo pro stavební konstrukce rozmanitých typů. Ověření použitelnosti bylo provedeno na široce používané oceli 34CrNiMo6. Pro porovnání výsledků lomové houževnatosti byly použity jak standardní vzorky pro tříbodový ohyb, tak podrozměná tělesa (tj. mini-Charpy). Vyhodnocení bylo provedeno podle normy ASTM E 1820. Po obrobení vzorků byla na nich nakmitána trhlina. Poté byly na zkušebních tělesech vyrobeny boční vruby a testovány metodou více těles. Po zkoušce byla tělesa obarvena, křehce dolomena v tekutém dusíku a byly měřeny délky trhlin pomocí digitálního zpracování obrazu. Na základě známých délek trhlin a získaných záznamů byla sestrojena J-R křivka a vyhodnocena hodnota lomové houževnatosti pro obě geometrie těles [2]. Vzhledem k malé velikosti vzorků mini-Charpy nebyla splněna rozměrová kritéria daná normou a byla vyhodnocena lomová houževnatost platná pro danou tloušťku J_Q . J-R křivky pro obě geometrie jsou znázorněny na Obr. 1. Odchylna mezi oběma hodnotami lomové houževnatosti je pouze 1,7% navzdory tomu, že dle normy nebyla splněna rozměrová kritéria.

Určení přechodové teploty FATT pomocí vzorků mini-Charpy

Zkoušky byly provedeny za účelem zjištění přechodu mezi houževnatým a křehkým lomem v závislosti na teplotě. Stanovení přechodové teploty FATT bylo provedeno na standardních zkušebních Charpy tělesech a mini-Charpy tělesech. Pro určení přechodové teploty pomocí mini a standardních vzorků se používá vztah (1) [3].

$$FATT_{\text{standard}} = FATT_{\text{mini}} + C \quad (1)$$

Kde C je materiálová konstanta (posun FATT vzhledem k velikosti vzorku). Pro stanovení teploty FATT pomocí mini-Charpy vzorků bylo nutné určit hodnotu konstanty C. Pro provedení zkoušek byl jako experimentální materiál vybrán svarový spoj sestávající ze dvou žáruvzdorných ocelí na bázi chrom-molybden a svarového kovu. Tento typ svaru je běžně používán v energetice. Byly provedeny zkoušky ve všech pěti zkoumaných zónách heterogenního svarového spoje. Příklad přechodové křivky u zóny BM2 je znázorněna na Obr.. Hodnota konstanty C byla stanovena $C = 60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Určení vysokocyklové únavy pomocí miniaturizovaných zkušebních těles

Použitelnost miniaturních vzorků pro zkoušky únavy byla demonstrována na materiálu 11CrMo9-10 ocelové slitiny, která je široce používána v energetice. Zkoušky vysokocyklové únavy na miniaturizovaných vzorcích byly provedeny na servo-hydraulickém zkušební stroji MTS Bi-ONIX s kapacitou 25 kN v režimu tah - tlak. Testy byly prováděny řízenou silou s koeficientem nesouměrnosti cyklu $R = -1$ při frekvenci přibližně 50 Hz. Výsledky testů jsou uvedeny jako počet cyklů do lomu, které jsou vyneseny v závislosti na amplitudě napětí v semilogaritmickém měřítku. Vzorky, které přežily 10^7 cyklů, jsou označeny šipkami.

Výsledky mají poměrně velký rozptyl, proto je mez únavy σ_C v obou případech vyhodnocena jako maximální amplituda napětí, při kterém vzorek nepraskl ani po 10^7 cyklů. Na této úrovni napětí byly provedeny dva platné testy. Porovnání velikosti se standardním vzorkem VCÚ a porovnání výsledků nestandardních a standardních únavových testů je uvedeno na Obr. .

Ostatní zkoušky

Použití miniaturních vzorků je vhodné i pro další zkoušky mechanických vlastností. Byly provedeny a úspěšně porovnány výsledky zkoušek nízkocyklové únavy, hodnoty dynamického modulu, dynamické tahové zkoušky nebo creepové zkoušky pomocí miniaturizovaných a standardních těles.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnání výsledků zkoušek mechanických vlastností získaných pomocí standardizovaných zkušebních těles a miniaturizovaných těles u vybraných zkoušek a tím ukázat potenciál použití vzorků malých rozměrů pro určení mechanických vlastností.

Získané deformační křivky M-TT jsou plně srovnatelné s výsledky standardních testů. Výsledky tahové zkoušky ukazují vynikající shodu při použití standardních zkušebních vzorků a M-TT těles.

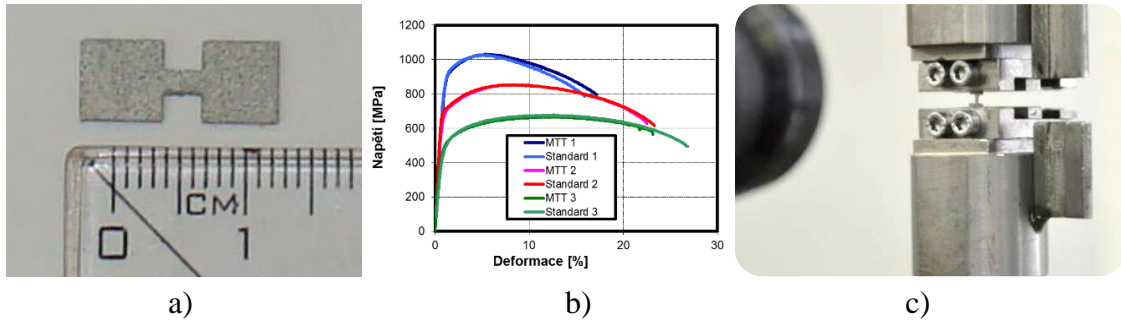
Pro stanovení lomové houževnatosti metodou více těles byly použity mini-Charpy vzorky (3x4x27 mm). Ačkoli prodloužení trhliny Δa u J-R křivky nepřesáhlo hodnotu cca 0,5 mm, výsledná hodnota lomové houževnatosti J_Q byla v dobré shodě s výsledkem lomové houževnatosti J_{IC} stanovené na standardních tělesech.

Pro stanovení přechodové teploty FATT při použití mini-Charpy vzorků je potřeba určit koeficient C, v našem případě byly přechodové teploty posunuty o 60 ± 2 °C.

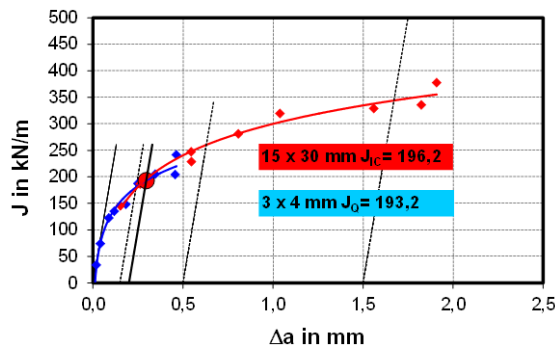
Provedení zkoušek vysokocyklové únavy potvrdily možnost získání spolehlivých výsledků na základě miniaturních vzorků bez nezbytnosti korelace výsledků. Všechny tyto aplikace ukazují možnost získat spolehlivé a opakovatelné výsledky zkoušek mechanických vlastností materiálů při použití miniaturizovaných standardních zkušebních těles.

Literatura

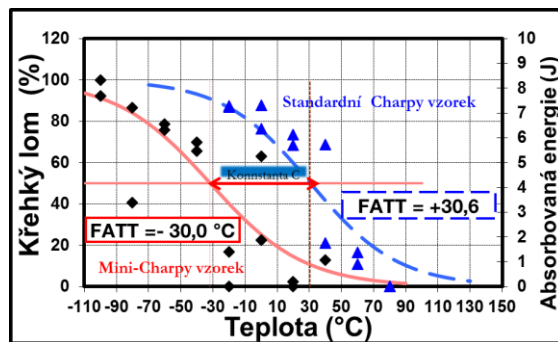
- [1] Konopík, K., Džugan, J, Procházka R (2013): *Evaluation of Local Mechanical Properties of Steel Weld by Miniature Testing Techniques*, Materials Science & Technology 2013, Montreal, Canada, ISBN 978-0-87339-762-9
- [2] M. Španiel, A. Prantl, J. Džugan, J. Růžička, M. Moravec, J. Kuželka: *Calibration of fracture locus in scope of uncoupled elastic-plastic-ductile fracture material models*, Advances in Engineering Software, Volume 72, June 2014, Pages 95-108
- [3] Corwin W. R. and Houghland A. M. (1986), *"Effect of Specimen Size and Material Condition on the Charpy Impact Properties of 9Cr1MoVNb Steel"*, ASTM



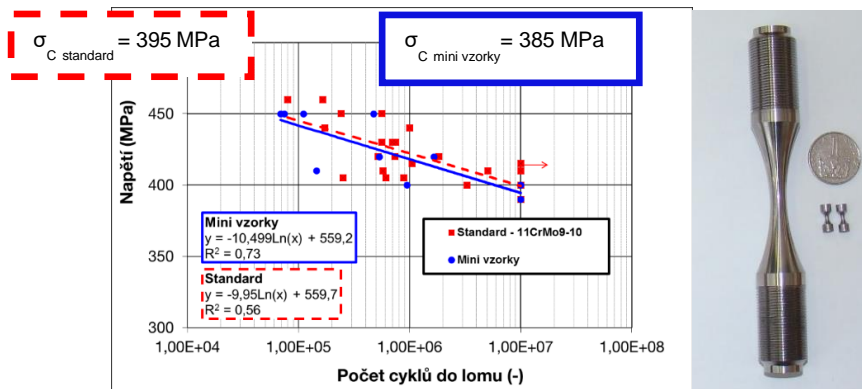
Obr. 1 a) M-TT těleso, b) Srovnání standardních a M-TT záznamů, c) čelisti pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje



Obr. 1 J-R křivka 34CrNiMo6, dodaný stav materiálu



Obr. 3 Přechodová křivka základního materiálu 2



Obr. 4 Porovnání vzorků vysokocyklové únavy

35 LET AUTOMATIZOVANÉHO NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ TNR TYPU VVER

35 YEARS OF AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WWER TYPE REACTOR PRESSURE VESSELS

Jan Vít, Lukáš Stainer a Zdeněk Skála

ŠKODA JS a.s.

Abstrakt

Provozní nedestruktivní kontrolou tlakové nádoby reaktoru 2. bloku elektrárny V-1 (EBO) z vnitřního povrchu v roce 1982 byla zahájena ve firmě ŠKODA Plzeň etapa automatizovaného zkoušení na jaderných elektrárnách typu VVER. Stručné ohlédnutí do historie, zajímavé informace a zejména současný stav provozních kontrol ve společnosti ŠKODA JS a.s. jsou hlavní náplní příspěvku.

The period of automated testing on WWER type nuclear power stations started in ŠKODA Plzeň company in 1982 by the in-service inspection of reactor pressure vessel of V-1 power station (EBO) Unit 2 from the inner surface. Short look back, interesting information and mainly the present state of in-service inspections in ŠKODA JS a.s. company are the main contents of the paper.

1. Úvod

V srpnu 1982 byla tlaková nádoba reaktoru (TNR) typu VVER 440 2. bloku jaderné elektrárny V-1 (Jaslovské Bohunice, Slovensko) nedestruktivně zkoušena při provozní kontrole poprvé automatizovaným způsobem z vnitřního povrchu systémem Škoda REACTORTEST TRC. Tak začala etapa automatizovaného zkoušení reaktorů typu VVER, která trvá bez přerušení ve ŠKODĚ JS a.s. dodnes. Vzácný snímek řídicího a vyhodnocovacího pracoviště je na Obrázku 1.

2. Stručná statistika

Odbor Provozní prohlídky a prohlídky (Škoda JS, divize Servis JE) realizoval za uplynulých 35 let celou řadu předprovozních a provozních kontrol tlakových nádob reaktorů (TNR), svarů hlavního cirkulačního potrubí (HCP), vnitřních částí reaktorů (VČR) a parogenerátorů (PG) typu VVER automatizovaným (mechanizovaným) způsobem. Dále jsou uvedeny souhrnné počty kontrol k datu konání konference:

- **72** kontrol **TNR** typu VVER 440 a VVER 1000 z **vnitřního** povrchu (od roku 1982/2000)
- **84** kontrol svorníků, matic a závitových hnízd (lůžek) **TNR** typu VVER 440 a VVER 1000 (od roku 1982/2000)
- **53** kontrol **TNR** typu VVER 440 a VVER 1000 z **vnějšího** povrchu (od roku 1986/2000)
- **95** kontrol smyček (á 6 obvodových svarů) **HCP** typu VVER 440 (od roku 1996)
- **21** kontrol obvodového svaru **víka** **TNR** typu VVER 440 (od roku 1999)
- **35** kontrol **větví** (á 5 obvodových svarů) **HCP** typu VVER 1000 (od roku 2000)
- **29** kontrol **VČR** typu VVER 1000 (od 2003)
- **3** odběry **vzorků z návaru** **TNR** typu VVER 440 (od roku 2005) + ÚJV, a. s.
- **44** kontrol **teplosměnných** trubek (á 1 kolektor) **PG** typu VVER 440 a VVER 1000 (od roku 2011/2012) + VUJE, a.s.

3. Zkušební systémy (manipulátory)

3.1. Tlaková nádoba reaktoru (TNR)

Používané zkušební systémy (manipulátory) pro automatizované zkoušení TNR z vnitřního povrchu byly již na konferenci představeny v minulých letech – viz např. [1], proto jen velmi stručné připomenutí již řečeného.

Zkušební systém švédské firmy TRC nesl plný název **Škoda REACTORTEST TRC**. Tento manipulátor byl v letech 1982÷92 použit celkem při 31-ti provozních (předprovozních) kontrolách tlakových nádob reaktorů pouze typu VVER 440.

Zkušenosti z provozu manipulátoru TRC byly plně využity při vývoji, konstrukci a výrobě nového manipulátoru **SKIN**. Od roku 1992 byl manipulátor SKIN zatím použit při 38-ti provozních (předprovozních) kontrolách TNR typu VVER 440 a VVER 1000. V letošním roce byl nasazen při odběru vzorků z návaru TNR 3. bloku EDU a stále zůstává alternativou k modernějšímu zkušebnímu systému MKS.

Hlavním přínosem nového manipulátoru **MKS** je zkrácení celkové doby provozních kontrol TNR oproti zařízení SKIN a rozšíření jeho použitelnosti i pro TNR typu VVER 1200 (MIR) a AP 1000. MKS byl dosud nasazen při čtyřech provozních kontrolách

Zkušební systémy (manipulátory) pro zkoušení TNR z vnějšího povrchu – USK-213 (VVER 440) a SK-187 (VVER 100) – se do rozsahu příspěvku prostě nevejdou.

3.2. Hlavní přírubový spoj (HPS)

Komponenty HPS (svorníky, matice a závitová lůžka v TNR) se obvykle nedestruktivně zkoušejí menšími manipulátory automatizovaným nebo mechanizovaným způsobem. Příklad zkoušení svorníků M 140x6 nejstarším manipulátorem **AMAŠ** je na Obrázku 2. Novější manipulátory (**KOMAŠ** a **KOMAŠ II**) budou představeny při orální prezentaci.

4. Lidské zdroje

Odbor (oddělení) Provozní prohlídky se začal formovat na jaře 1978 a jeho první vedoucí (Ing. J. Přepechal) vydržel v náročné funkci, prakticky bez výraznějších přerušení, až do přelomu tisíciletí. Na Obrázku 3 sedí vlevo ve skupině „otců zakladatelů“ oddělení PP. Další vedoucí (Ing. Z. Skála) předal pomyslný štafetový kolík na jaře 2014 Ing. L. Stainerovi, který svírá opatřené vedení v současné době. Společně jsou na Obrázku 4 (Skála druhý zleva a Stainer vedle uprostřed). Dodržuje se nepsané pravidlo, že vedoucí po předání funkce pokračuje dále jako expert až do doby, kdy se sám rozhodne ukončit pracovní činnost.

Současný personální stav odboru PPK je 31 pracovníků; podle neoficiálních záznamů prošlo od roku 1978 stavem cca 105 kolegyn a kolegů. Náročná práce a dlouhé služební cesty si logicky vybírají neúprosnou daň. Je zatím nezodpovězenou otázkou, jak personální stav ovlivní zpřísněné požadavky nového Atomového zákona.

5. Závěr

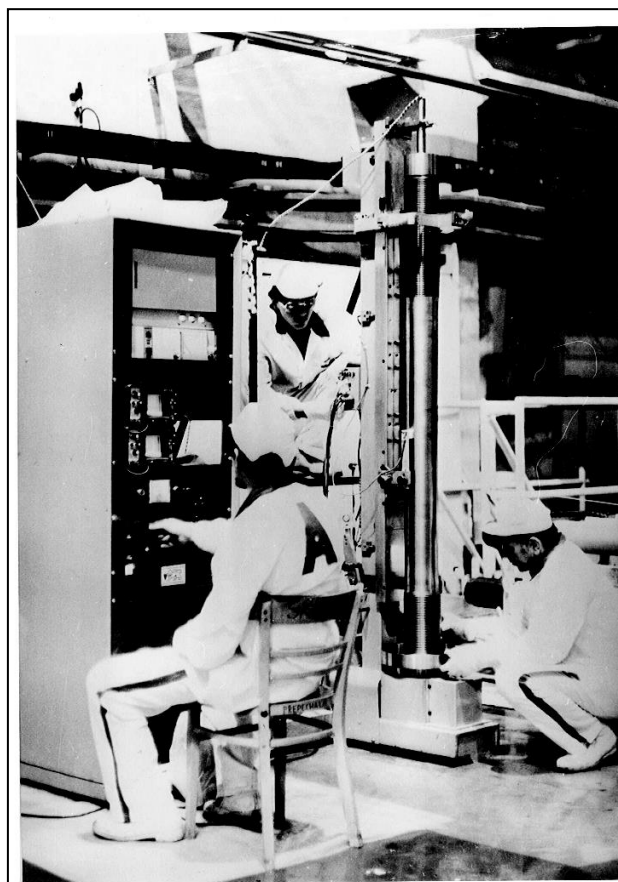
Z prostorových důvodů nebylo možné zmapovat všechny činnosti odboru PPK. Hlavní pozornost byla věnována kontrolám, které v letošním roce slaví 35. výročí – automatizované nedestruktivní zkoušení TNR z vnitřního povrchu a automatizované (mechanizované) zkoušení komponent HPS. Je jistě pouze náhodou, že jak v počtu používaných manipulátorů, tak i v počtu vedoucích můžeme mluvit o třech přímo navazujících třech generacích.

Literatura

- [1] Skála Z., Stainer L., Vít J. (2013): *Modulární kontrolní systém. Srní: 8. ročník konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách.*
- [2] *Archiv ŠKODA JS a.s.*
- [3] *Soukromé podklady autorů a bývalých pracovníků odboru PPK.*



Obrázek 1: Řídící a vyhodnocovací pracoviště při kontrole TNR EBO-V1



Obrázek 2: Zkušební systém (manipulátor) AMAŠ



Obrázek 3: J. Přepchal (sedí vlevo) a služebně nejstarší spolupracovníci



Obrázek 4: Autoři příspěvku a systém SKIN na RS AAES (Arménie)

STAVEBNĚ TECHNICKÉ PRŮZKUMY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ V ELEKTRÁRNÁCH

INVESTIGATIONS OF CONCRETE STRUCTURES IN POWER PLANTS

Jana Marková^{a)}, Jan Mlčoch^{a)}, Miroslav Sýkora^{a)}, Kamil Prešl^{b)} a Jan Molnár^{b)}

^{a)} ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

^{b)} ČEZ, a.s.

Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na kritické posouzení požadavků na stavebně technické průzkumy uvedené v mezinárodní a národních normách a v programu řízení spolehlivosti ČEZ a.s. (PŘS). Vychází se také z výsledků mezinárodních výzkumných projektů, z odborné literatury a z diskuzí s experty na průzkumy konstrukcí. Ukazuje se, že současné normativní dokumenty neposkytují dostatečně podrobné pokyny pro průzkumy a monitorování stavebních konstrukcí. Při plánování typu a rozsahu zkoušek je třeba uvážit účel, tedy zda se jedná o hodnocení současného stavu konstrukcí, nebo se provádí predikce zbytkové životnosti.

Paper is aimed at critical assessment of requirements on construction surveys given in international and national standards and Program of reliability management of company CEZ a.s. Selected results of international projects, handbooks and discussions with experts are considered. It is shown that current standards do not provide sufficiently detailed provisions for surveys and structural monitoring. The aim of structural survey is to be considered when type and extent of testing are planned, so whether the actual state of structure is evaluated or residual working life estimated.

Úvod

Požadavky na zajištění spolehlivosti a snížení nákladů na opravy nebo prodloužení životnosti vedou k rostoucím nárokům na průzkumy a monitorování klíčových stavebních konstrukcí v energetice. Ačkoli se na hodnocení skutečného stavu různých typů existujících konstrukcí, jejich monitorování a prohlídky zaměřuje řada norem včetně ČSN ISO 13822, ČSN 73 0038, ČSN EN 15331, ČSN 73 6221, ČSN 73 2604, ČSN 73 6221, ISO 16204 [1-6], v současné době chybí operativní pokyny především pro betonové konstrukce, které by poskytovaly dostatečné informace o volbě vhodných metod monitorování, o četnosti prohlídek a počtu měření v čase a prostoru, zpracování výsledků měření s ohledem na různé typy nejistot apod.

Příspěvek se zabývá kritickým posouzením pokynů vybraných mezinárodních dokumentů zaměřených na průzkumy a monitorování a požadavky pro stavebně technické průzkumy betonových konstrukcí podle programu řízení spolehlivosti ČEZ, a.s. Porovnání vychází z předchozích studií autorů, založených na podkladech v odborné literatuře, ze zahraničních normativních dokumentů a z diskuzí s experty na průzkumy konstrukcí.

Požadavky v mezinárodních dokumentech a metodikách

Rozsáhlý evropský projekt SAMCO <www.samco.org> vedl ke zpracování příručky F08b, která se zaměřuje na průzkumy stavebních konstrukcí s ohledem na působící zatížení, účel diagnostiky, identifikaci poruch, jejich příčin a posouzení jejich vlivu na spolehlivost. Přílohy této příručky obsahují užitečné informace o typech senzorů a zkušenostech z monitorování mostů a konstrukcí.

Požadavky na průzkumy uvádějí například také následující národní normy:

- ruská GOST R se zabývá stavebně technickými a geotechnickými průzkumy,

- rakouská RVS 13.03.01 zohledňuje informace z průzkumů jako doplňkové k výsledkům testů a poskytuje přehled norem s požadavky na zajištění kvality průzkumů,
- italská UNI/TR 11634 uvádí kritéria pro monitorování různých typů konstrukcí.

ČSN 73 2604 [4] uvádí požadavky na prohlídky ocelových konstrukcí, ČSN 73 6221 na prohlídky mostů, německý předpis VDI 6200 [7] na konstrukce z různých materiálů (tab. 1).

Provedená analýza naznačuje, že je třeba zpracovat normativní doporučení týkající se:

- výběru vhodné metody pro sledování vybrané veličiny (např. hloubky karbonatace),
- počtu prvků nebo konstrukcí, které postačuje sledovat v případě skupiny opakujících se prvků nebo konstrukcí,
- identifikace kritických nosných prvků nebo průřezů,
- optimalizace počtu měření a jejich prostorové rozložení pro rozsáhlé konstrukce jako chladicí věže a průmyslové komíny,
- optimalizace četnosti průzkumu s ohledem na sledovaný způsob porušení, rychlost degračních procesů a požadovanou zbytkovou životnost,
- stanovení limitních hodnot pro sledované parametry,
- zohlednění nejistot měření při interpretaci výsledků.

Kritické zhodnocení metodiky PŘS

Program řízení spolehlivosti ČEZ, a.s. poskytuje v porovnání s normativními dokumenty detailnější požadavky na:

- sledované veličiny (geometrické imperfekce, tloušťka krycí vrstvy, pevnost betonu v tlaku, přídržnost povrchových vrstev, mrazuvzdornost, hloubka karbonatace atd.),
- intervaly mezi průzkumy podle jejich typů a počty měření pro plošné prvky.

Z porovnání s informacemi v odborné literatuře a v zahraničních normativních dokumentech a z diskuzí s experty na průzkumy stavebních konstrukcí vyplývá, že:

- rozsahy zkoušek v PŘS obvykle představují minimální požadavky,
- u časově nezávislých veličin (např. tloušťka krycí vrstvy betonu) lze využít data z předchozích měření, je však potřebné ověřit homogenitu měření (viz příklad 1),
- zkoušku mrazuvzdornosti betonu je dostatečné provádět jednou za životnost konstrukce,
- u hloubky karbonatace se doporučuje zvýšit četnost testů,
- referenční plochy, na kterých se opakovaně sledují vybrané veličiny, představují jedinečnou možnost pro kalibraci teoretických modelů časově závislých jevů (příklad 2),
- při plánování typu a rozsahu zkoušení je třeba uvážit účel, tedy zda se jedná o hodnocení současného stavu konstrukcí, nebo se provádí predikce zbytkové životnosti.

Příklad 1 – posouzení homogenity souborů měření krycí vrstvy. Měření krycí vrstvy ve dvou různých obdobích vedlo k následujícím statistickým charakteristikám:

$$\begin{aligned} \text{soubor 1: } n_1 &= 39; m_1 = 58.0 \text{ mm}; s_1 = 14.1 \text{ mm} \\ \text{soubor 2: } n_2 &= 30; m_2 = 55.2 \text{ mm}; s_2 = 11.0 \text{ mm} \end{aligned} \quad (1)$$

kde n je počet měření a m a s jsou nestranné odhady průměru a směrodatné odchytky. Ověřuje se, zda rozdíl $m_1 - m_2$ (pro $m_1 \geq m_2$) lze považovat za náhodný:

$$\begin{aligned} \text{testovaná veličina: } t_0 &= (m_1 - m_2) / \sqrt{(S_1 + S_2)} = 0,89 \\ \text{kritická hodnota: } -t_{\alpha/2} &= t_{1-\alpha/2} = [-t_{\alpha/2}(n_1-1) S_1 + t_{1-\alpha/2}(n_2-1) S_2] / (S_1 + S_2) = 2,03 \end{aligned} \quad (2)$$

kde $S_i = s_i^2 / (n_i - 1)$; $\alpha = 0,05$ značí hladinu významnosti a $t_p(n-1)$ je kvantil Studentova rozdělení pro $n-1$ stupňů volnosti. Rozdíl mezi průměry není významný, neboť platí podmínka $t\alpha/2 < t_0 < t1-\alpha/2$ a přijímá se hypotéza, že průměrná pevnost obou souborů se významně neliší. Obdobným způsobem se otestují rozptyly obou souborů [8].

Příklad 2 – kalibrace posouzení homogenity souborů měření krycí vrstvy. Měření na referenční ploše poskytlo údaje o hloubce karbonatace v období 41-45 let od zprovoznění konstrukce (obrázek 1). Vývoj hloubky karbonatace se popisuje regresním vztahem $A\sqrt{(t-t_0)}$, kde A a t_0 jsou regresní koeficienty. Obrázek 1 ukazuje rychlý postup karbonatace. Z porovnání mezi naměřenými hodnotami a výsledky predikovanými regresním vztahem vyplývá, že modelovou nejistotu lze popsat variačním koeficientem o hodnotě 20 %.

Doporučení na základě zkušeností s průzkumy stavební konstrukcí v energetice

Zkušenosti ze sledování chladicích věží, komínů a dalších konstrukcí ukazují, že:

- 1) Před stanovením požadavků na sledování stavební konstrukce je potřebné stanovit účel a rozsah požadovaných informací s ohledem na možné následky překročení uvažovaného mezního stavu a na požadovanou životnost konstrukce.
- 2) Návrh systému sledování stavebních konstrukcí je komplexní úloha, která zahrnuje následující kroky:
 - a) Pravděpodobnostní rozbor, který odhadne časově závislou spolehlivost prvku nebo systému a naznačí vliv základních veličin na sledovaný způsob porušení; zkušenosti z předchozího působení konstrukce lze uvážit na základě pravděpodobnostní aktualizace.
 - b) Identifikaci možných způsobů sledování, odhad nákladů na sledování a specifikaci nejistot souvisejících s měřením.
 - c) Stanovení mezních hodnot pro sledované veličiny, které se obvykle opírá o optimalizaci nákladů s uvážením očekávaných následků poruchy.
 - d) Výběr optimálního způsobu sledování na základě celkové optimalizace nákladů [8], pro kterou je potřebné predikovat rozvoj degračních procesů a modelovat variabilitu proměnných zatížení.
- 3) Dobře navržený systém sledování umožňuje okamžitou aktualizaci odhadu spolehlivosti konstrukce a včasné plánování opravy.

Optimalizace průzkumů a monitorování přináší v současné době významné úspory provozních nákladů staveb nejen v energetice, ale např. i dopravě (mosty a tunely) a v místech, kde dochází ke shromažďování velkého počtu lidí (stadiony, kongresové haly, víceúčelové arény). Výměna zkušeností mezi různými průmyslovými sektory může podpořit optimalizaci systémů sledování. V současné době se na uvedenou problematiku zaměřuje evropský projekt COST TU1402, v rámci kterého se zpracovalo velké množství podkladových materiálů dostupných na cost-tu1402.eu.

Závěrečné poznámky

Ukazuje se, že současné normativní dokumenty neposkytují dostatečně detailní pokyny pro průzkumy a monitorování stavebních konstrukcí a bylo by potřebné je zpracovat, zejména pro betonové konstrukce. PŘS obsahuje detailní pokyny, které zpravidla představují minimální požadavky. Při plánování typu a rozsahu monitorování a zkoušení je třeba uvážit účel, tedy zda se jedná o hodnocení současného stavu konstrukcí, nebo se provádí predikce zbytkové životnosti.

Poděkování

Příspěvek je součástí řešení TA ČR TE01020068 CESEN. Využily se výsledky řešení projektu SGS16/195/OHK1/2T/31 (Studentská grantová soutěž ČVUT v Praze).

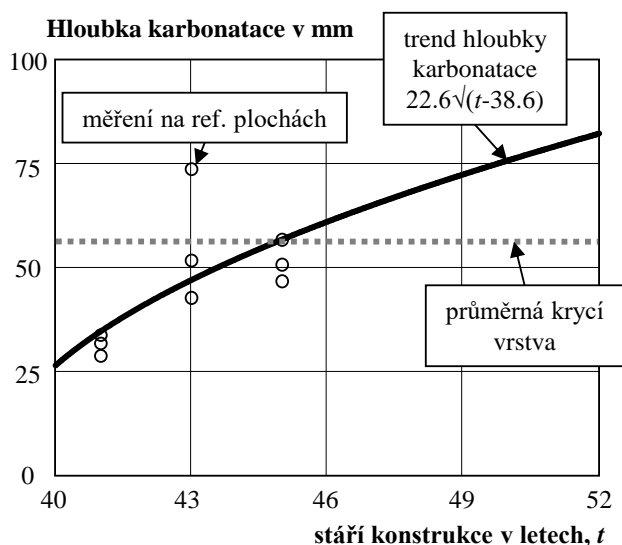
Literatura

- [1] ČSN ISO 13822 *Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí*, 2014
- [2] ČSN 73 0038 *Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí - Doplnující ustanovení*, 2014.
- [3] ČSN EN 15331. *Kritéria pro návrh, management a řízení služeb údržby budov*. ÚNMZ, 2012.
- [4] ISO 16204. *Durability - Service life design of concrete structures*. ISO, 2012.
- [5] ČSN 73 2604. *Ocelové konstrukce - Kontrola a údržba ocelových konstrukcí pozemních a inženýrských staveb*. ÚNMZ, 2012.
- [6] ČSN 73 6221 *Prohlídky mostů pozemních komunikací*
- [7] VDI 6200 *Structural safety of buildings - Regular inspections*, Association of German Engineers, 2010
- [8] MARKOVÁ J., MLČOCH J., SÝKORA M., MOLNÁR J. a PREŠL K. *Životnost železobetonových komínů a chladících věží – Zpřesnění kritérií pro hodnocení*, konference "Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách", Smí, 10/2016.
- [9] ČSN EN 1990. *Zásady navrhování konstrukcí*. ÚNMZ, 2004.

Tab. 1. Intervaly pro průzkumy podle ČSN 73 2604 [4] a VDI 6200 [7].

Norma	Typ konstrukce, třída následků CC podle ČSN EN 1990 [9]	Běžná prohlídka	Podrobná prohlídka	Posouzení expertem
ČSN 73 2604 [5]	Ocelové stožáry a komíny.	Po roce provozu a dále po třech letech.	5 let	Není uvedeno.
ČSN 73 6221 [6]	Mosty	1-2 ročně *	2 - 6 let*	
VDI 6200 [1]	CC1	5 let	Není uvedeno.	Není uvedeno.
	CC2	3 let	5 let	15 let
	CC3	2 let	3 let	10 let

* Podle klasifikačního stupně stavu



Obr. 1. Hloubka karbonatace v závislosti na stáří konstrukce – měření a předpokládaný trend.

POČTY NÁHRADNÍCH DÍLŮ S OHLEDEM NA JEJICH KRITičNOST A DOBU DODÁNÍ

NUMBER OF SPARE PARTS DEPENDING ON THEIR CRITICALITY AND DELIVERY TIME

Jan Kamenický, Pavel Ságl a Jaroslav Zajíček

Technická univerzita v Liberci

Abstrakt

JE Dukovany řeší v oblasti systémů SKŘ ukončení výroby některých náhradních dílů. S ohledem na další provoz elektrárny je tedy nutné se předzásobit na dobu očekávaného provozování, případně na dobu do plánované obnovy. Příspěvek se zabývá problematikou počtu potřebných náhradních dílů s ohledem na spolehlivost, kritičnost a požadovanou dobu provozování zařízení.

NPP Dukovany solves the termination of some spare parts production. With regard to the further operation it is necessary to frontload for the period of the expected operation or for the period before the planned renewal. The paper deals with the number of spare parts according to dependability, criticality and the required operating time.

Úvod

Pro úspěšnost procesu plánování náhradních dílů (dále jen ND), je třeba disponovat takovými daty a informacemi, které mohou popsat spolehlivost komponent, jejich kritičnost z hlediska bezpečnosti, kontinuity a ekonomičnosti provozu a možnosti dodání ND. Potřeba řešení problematiky ND se v oblasti SKŘ (Systém kontroly a řízení), konkrétně systém PAMS (Post-Accident Monitoring System) stala o to víc aktuální díky ukončení výroby některých použitých zařízení ze strany výrobce.

Taková situace má teoreticky několik možných způsobů řešení, a to:

- předzásobit se vhodným počtem ND na požadovanou dobu provozování JE,
- najít vhodnou alternativu pro daná zařízení, případně nechat zařízení vyrobit individuálně na zakázku,
- realizace obnovy systému.

Posouzení jednotlivých variant

Výše uvedené 3 způsoby možného řešení situace souvisí s následujícími problémy, které je třeba při rozhodování o vhodné variantě zohlednit / vyřešit.

Předzásobení na celou dobu očekávaného provozování JE:

- doba provozování JE není předem jistá,
- velká investice do ND v současné době,
- stárnutí a nutná údržba ND ve skladech.

Alternativní zařízení (tzv. ekvivalent):

- problémy s kompatibilitou s ostatními zařízeními,
- vhodná alternativa nemusí být vůbec nalezena.

Realizace obnovy systému:

- vysoké náklady obnovy (jsou nahrazeny i zařízení, pro které jsou ND stále dostupné),
- předzásobení ND na dobu do obnovy.

Pro navazující výpočet potřebného počtu ND byla předpokládána varianta obnovy systému. Obnova má být realizována v časovém horizontu 5 let, potřebný počet ND bude tedy odpovídat tomuto období.

Výpočetní model

Pro optimální nastavení úrovně ND použitých zařízení (výrobních typů) je nutné vyjít z údajů, které ovlivňují jejich cirkulaci v provozním prostředí. Je evidentní, že zásadními parametry tohoto procesu bude:

- rozsah populace výrobních typů komponent,
- provozní hodiny výrobních typů komponent,
- poruchovost výrobních typů komponent,
- dostupnost příslušných ND,
- úroveň kritičnosti komponenty s ohledem na bezpečnost, kontinuitu a ekonomičnost technologického procesu.

V případě ekonomických podkladů o ceně náhradních dílů, ceně skladování a nákladech souvisejících s nedostatkem náhradních dílů je dále možné najít nákladově nejvýhodnější počty náhradních dílů.

Stanovení hladin ND pro daný systém by logicky mělo vyjít z poruchovosti použitých výrobních typů. Nedostatek ND bude potom nutně souviset s pravděpodobností, že vznikne určitý počet poruch na zařízení daného typu, a to konkrétně $n+1$ poruch, pokud předpokládáme, že počáteční skladové množství ND je n . Toto tvrzení platí pro zařízení, u kterých se neaplikuje žádná z variant preventivní údržby, která by dále odčerpávala skladové zásoby ND. Pro zjištění potřebného počtu náhradních dílů je tedy nutno zjistit, s jakou pravděpodobností vznikne během daného období nejvýše n poruch na sledovaných zařízeních.

Tuto pravděpodobnost lze matematicky stanovit pomocí distribuční funkce Poissonova rozdělení, do které jako parametr vstupuje podíl doby dodání ND ku hodnotě střední doby mezi poruchami (dále jen MTBF). Vzhledem k tomu, že již dostupnost ND dále nebudeme předpokládat, lze dobu dodání ND považovat za dobu odpovídající době požadovaného provozování, tzn. celých 5 let.

Běžně se u plánování ND pro provoz významné důležitosti používají konfidenční meze v úrovni nejméně 99 %. Zjednodušeně to znamená, že ze 100 druhů náhradních dílů bude v průměru jeden díl chybět.

Kromě popsaného postupu pomocí Poissonova rozdělení lze efektivně využít zjednodušený vztah podle [3], který přináší dostatečně přesné výsledky:

$$A(n) = \lambda \cdot n \cdot t + Z\sqrt{\lambda \cdot n \cdot t} \quad (1)$$

kde $A(n)$ je přípustný počet poruch,

λ je intenzita poruch zařízení daného výrobního typu, pro který se nastavuje úroveň ND [h⁻¹],

n je počet kusů provozovaných zařízení daného výrobního typu

t je dodací doba ND [h],

Z je konfidenční mez z normovaného normálního rozdělení

První sčítanec je prostý odhad středního počtu ND. Druhý sčítanec je navýšení počtu ND na základě kritičnosti komponenty, která vychází zejména z významnosti

zajištění bezpečnosti a dostupnosti provozu zařízení. Pro bezpečnostně významné provozu je vhodné volit vysoké úrovně konfidence (např. 99,95-99,99). Tím je dle zvolené pravděpodobnosti minimalizováno riziko vyčerpání skladu s ND, na druhou stranu vzrostou ekonomické dopady z nákupu takového počtu ND a jejich skladování.

Opačná situace, kdy je znám počet ND a je třeba zjistit, s jakou pravděpodobností bude počet ND dostačující, je v podstatě inverzní úloha k výpočtu potřebného počtu ND.

Z výše uvedeného vzorce bude vyjádřena hodnota Z. Výslednou pravděpodobnost lze z hodnoty Z získat buď pomocí převodních tabulek normovaného normálního rozdělení, nebo například pomocí funkce v MS Excel. Výsledný vztah pomocí funkcí v prostředí MS Excel vypadá následovně:

$$P = NORM.S.DIST(Z; kumulativní) = NORM.S.DIST\left(\frac{\lambda \cdot n \cdot t}{\sqrt{\lambda \cdot n \cdot t}}; kumulativní\right) \quad (2)$$

Výsledky a závěr

Věrohodnost výsledků závisí na kvalitě a věrohodnosti vstupních dat, kdy přesnější výstupy budou pro situace dlouhodobějšího sledování a současně v případě vyšší poruchovosti. Pro výpočty byly využity MTBF provozní, které jsou výsledkem monitoringu spolehlivosti. Vlastní výpočet byl proveden v prostředí MS Excel.

V případech, kdy na výrobním typu dosud nevznikla porucha, se pravděpodobnost výdrže ND konzervativně počítá z 50% konfidenční meze hodnoty MTBF.

Vstupní data o jednotlivých výrobních typech a zjištěné hodnoty pravděpodobností jsou tabelárně zaznamenány v tabulce 1.

Výsledná pravděpodobnost, že po dobu pěti let budou ND postačující pro všechny provozované pozice uvedených výrobních typů, vychází pouze necelých 13 %. Na takto nízké pravděpodobnosti se nejvíce podílejí 2 výrobní typy, a to LK 4003-6ERTB1 a VME16AN50. U těchto výrobních typů je vhodné situaci řešit zajištěním vyššího počtu ND nebo nalezením vhodné náhrady. Další výrobní typy, u kterých by případné navýšení bylo vhodné, jsou VME16AN10 a VME16AN30.

Poslední sloupec tabulky obsahuje pravděpodobnosti s doporučeným navýšením skladových zásob. Díky novému počtu ND by bylo u každého výrobního typu dosaženo pravděpodobnosti vyšší než 99 % a pravděpodobnost výdrže všech uvedených výrobních typů by současně vzrostla na více než 97 %.

V rámci konferenčního příspěvku nebylo cílem seznámit s jednotlivými výrobními typy, jejich funkcionalitami v rámci systému a výpočtem spolehlivostních ukazatelů, ale ukázat pomocí reálných dat způsob vyčíslení počtu náhradních dílů, respektive pravděpodobnosti, že jejich počet je v rámci požadovaného období postačující.

Literatura

- [1] ČSN IEC 60605-4:2002 *Zkoušení bezporuchovosti zařízení - Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení - Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly.*
- [2] ČSN IEC 605-4: 1992-2002 *Zkoušky bezporuchovosti zařízení, Část 4: Postupy pro stanovení bodových odhadů a konfidenčních mezí z určovacích zkoušek bezporuchovosti zařízení.*
- [3] CALABRO S. R. (1965): *Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi. Praha: SNTL.*

Tabulka 1: Vstupní data a výsledky

Výrobní typ	Stávající počet ND + návrh na navýšení	MTBF provozní [h]	Počet komponent	Počet poruch	Pravděpodobnost výdrže stávajícího počtu ND po dobu 5 let	Pravděpodobnost výdrže navýšeného počtu ND po dobu 5 let
5520UX	11	1,8E+04	8	0	0,999998869	0,999998869
G185	26	1,2E+06	32	1	1	1
IRTS 5115XG	16	5,6E+04	24	0	0,999999986	0,999999986
LDU (MT-80)	5	6,1E+05	16	0	1	1
LK 4003-6ERTB1	1+4	4,1E+05	16	2	0,293734608	0,994082462
LK 4301-7ERTB1	4	8,2E+05	32	0	0,999999994	0,999999994
LK 4601-7ERT	4	4,1E+05	16	0	0,999999995	0,999999995
LS 4601-7ERTB1	4	4,1E+05	16	0	0,999999995	0,999999995
S711D-EST	3	9,1E+05	24	0	0,999999939	0,999999939
VME08DL	4	6,1E+05	16	1	0,996093388	0,996093388
VME16AN10	4+1	3,1E+05	12	3	0,961622732	0,994422754
VME16AN20	4	4,1E+05	12	0	1	1
VME16AN30	8+1	3,9E+05	36	6	0,975459857	0,993153596
VME16AN40	3	1,0E+05	4	0	0,999981319	0,999981319
VME16AN50	8+7	2,2E+05	40	10	0,505140551	0,993673751
VME32DI	9	9,2E+05	48	3	0,999995541	0,999995541
VSBC6862	35	3,1E+05	16	3	1	1
Systém složený z uvedených zařízení					0,138634383	0,971724561

ŘÍZENÍ CHEMICKÉHO REŽIMU PAROVODNÍHO OKRUHU DLE DOPORUČENÍ EPRI VS. VGB

WATER CHEMISTRY CONTROL OF STEAM/WATER CYCLE SYSTEM BY EPRI VS. VGB GUIDELINES

Alena Kobzová a Martin Krondřák

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

Abstrakt

Chemický režim v parovodním okruhu má vliv na efektivitu výroby a životnost zařízení. Hlavním cílem je minimalizace tvorby nánosů na teplosměnných plochách a minimalizace korozních dějů na komponentách parovodního okruhu. Existují různá doporučení na řízení chemického režimu: EPRI guidelines, VGB normy, doporučení výrobci jednotlivých komponent a místní standardy a provozní instrukce. V rámci VaV projektu: Turbíny - vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI byla porovnána výše uvedená doporučení a zhodnocen jejich přínos z hlediska vzniku důlkové koroze na lopatkách turbín.

Water chemistry of steam/water cycle system influences on production effectivity and lifetime of equipment. Minimisation of deposit formation on heat-exchange surfaces and minimisation of corrosion on components of steam/water cycle system is the main aim. Different recommendations could be used for water chemistry control, for example: EPRI guidelines, VGB standard, recommendation of component producer, local standard and operation manual. In terms of R&D Project – Turbines – Development of Procedures for Blade Degradation Management were compared these recommendations and their benefits was evaluated in light of pitting corrosion creation on turbine blades.

Úvod

Cílem VaV projektu: Turbíny - vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI [1] bylo nasazení nových diagnostik monitorujících rozvoj důlkové koroze u oběžných lopatek a praktické využití informací z programu P65 EPRI pro posuzování rozvoje trhlin pro poškozené lopatky. Jedna z podetap projektu byla zaměřena na posouzení vlivu provozních podmínek a podmínek odstavení z hlediska vzniku a rozvoje důlkové koroze k možnosti její eliminace. V rámci této podetapy byla porovnána různá doporučení pro řízení chemického režimu a zhodnocen jejich přínos z hlediska vzniku důlkové koroze na lopatkách turbín. Chemický režim parovodního okruhu je řízen tuzemskými normami a standardy s ohledem na doporučení výrobců jednotlivých komponent. Další doporučení pro řízení parovodního cyklu uvádí EPRI guideline [2] a VGB norma [3].

Parovodní okruh

Parní kotle lze podle tlakového systému rozdělit na bubnové kotle s přirozeným, či nuceným oběhem a na kotle průtlačné.

Energetická zařízení s bubnovými kotli vyšších tlaků jsou často určena pro kombinovanou výrobu elektřiny a dodávku tepla. Napájecí vodou je demineralizovaná voda. Napájecí voda se alkalizuje těkavými látkami dávkovanými do výtlaku kondenzátních čerpadel, např. amoniakem, aminy, a dále fosfátem nebo NaOH do bubnu kotle. Je-li v systému použita jako konstrukční materiál měděná slitina, přidává se hydrazin pro dosažení záporného redoxního potenciálu.

Energetická zařízení s průtlačnými kotli jsou většinou určena k výrobě elektřiny. Napájecí vodou je demineralizovaná voda vysoké kvality, s nízkým obsahem solí a zejména SiO₂. Na

rozdíl od bubnového kotle, není u průtlačného kotle systém odluhování. Alkalizace je možná pouze těkavými látkami (aminy, amoniak), dávkovanými do výtlačku kondenzátních čerpadel.

Mezi faktory ovlivňující optimální provoz patří:

- konstrukční řešení,
- konstrukční materiál,
- kvalita napájecí a doplňovací vody,
- volba chemického režimu,
- způsob provozování.

Chemický režim parovodního okruhu

Chemický režim je dán typem kotle (průtlačný nebo bubnový), pracovním tlakem (NT, ST, VT nebo nadkritický), materiálovým složením (s Cu nebo bez Cu) a způsobem provozu (četnost odstavování a najíždění).

Vzhledem k tomu, že proces koroze se zpomaluje s klesající koncentrací kyslíku a rostoucím pH, jsou napájecí a kotelní vody alkalizovány. Snížení obsahu kyslíku závisí na chemickém režimu okruhu.

Pro alkalizaci mohou být používány pevné alkalizační prostředky nebo těkavé alkalizanty. Mezi pevné alkalizanty patří fosfáty (PC režim) a NaOH (CT režim). Pevné alkalizanty nepřecházejí do páry a tudíž nechrání část okruhu po kondenzaci páry.

Těkavé alkalizanty chrání kondenzační i napájecí část okruhu. Mezi těkavé alkalizanty patří amoniak (oxidační a redukční AVT režim) nebo alkalizační či filmotvorné aminy. Posledním typem chemického režimu je kyslíkový režim, kdy je dávkován čpavek pro nastavení optimálního pH spolu s kyslíkem pro pasivaci ocelových materiálů ve styku s vodou. Tento režim je určen pro systémy s ocelovými komponentami a s možností udržet čistotu napájecí vody do 0.15 $\mu\text{S}/\text{cm}$. U systémů bez použití materiálů z měděných slitin je doporučen režim AVT(O) nebo OT. U provozů s mosaznými komponentami je doporučován režim AVT(R).

Cílem optimálního chemického režimu je:

- snížení koroze na minimum,
- maximalizace účinnosti kotle (minimalizovat tvorbu nánosů),
- maximální výkon turbíny (minimalizovat tvorbu nánosů),
- snížení nákladů na údržbu a opravy (bezporuchovost a bezpečnost),
- prodloužení životnosti.

Podstatou pro zjištění, co se děje v parovodním okruhu je monitoring chemických parametrů ve specifikovaných vzorkovacích lokalitách. On-line monitoring umožňuje řízení chemického režimu (např. dávkování alkalizačních činidel, atd.) a okamžitou indikaci neprovozních hodnot parametru a její lokalitu (obr.1). Specifikace a doporučení rozsahu, kvality a limit pro řízení chemického režimu jsou udávány EPRI, VGB, normami či výrobcem komponenty.

Monitorované parametry

Jsou definovány dvě hlavní skupiny základních parametrů:

- limity parametrů kotlové vody (pro bubnové kotle),
- limity parametrů páry (pro bubnové i průtlačné kotle).

Limity kotlové vody minimalizují korozi a vznik nánosů v kotli. Limity parametrů v páře minimalizují vliv koroze a vzniku nánosů v parní části, především na turbíně.

Dalším kritériem pro rozdělení parametrů je jejich využití pro řízení chemického režimu – řídicí a diagnostické parametry.

Řídicí parametry zahrnují požadované minimum pro dosažení optimální chemické kontroly. Všechny jsou měřeny on-line (pH, katexovaná vodivost, odplyněná katexovaná vodivost, specifická vodivost, rozpuštěný kyslík, sodík, křemík) s výjimkou pro monitorování přenosu železa, přestříku u bubnových kotlů a obsah chloridů. Tyto parametry jsou stanovovány periodicky laboratorně.

Diagnostické parametry slouží k odhalení problémů při provozu nebo jsou důležité při neprovozních stavech (najíždění, odstavení, cyklování atd.).

Pro provoz jsou definovány akční linie, udávající požadované hodnoty při standardním provozu (obvykle značené N) a linie AL1-4 udávající hodnoty, při kterých je nezbytné provést určitá opatření až do odstavení bloku do opravy. Hodnoty se v jednotlivých normách mírně liší.

Vzorkovací místa

Vzorkovací místa parovodního cyklu jsou dle doporučení EPRI následující (obr. 1):

- vstup do ekonomizéru (napájecí voda),
- kotlová voda (u bubnových kotlů),
- přehřátá/nasycená pára,
- výstup na doplňovací vodě,
- výstup z odplyňovaku,
- výtlak kondenzátních čerpadel,
- výstup BÚK (bloková úpravna kondenzátu).

VGB norma doporučuje limity pouze pro napájecí vodu, kotlovou vodu a páru. V jiných lokalitách nedefinuje žádný monitoring.

Vstup do ekonomizéru – mezi řídicí parametry napájecí vody patří hodnota pH, která úzce souvisí s korozní rychlostí konstrukčních materiálů a na jejím základě je řízeno dávkování alkalizačního činidla. Specifická vodivost je funkcí obsahu amoniaku a pH. Její hodnota odráží veškeré změny chemického režimu. Dalším řídicím parametrem je hodnota odplyněné katexované vodivosti, která nepřímo odráží obsah aniontů a organického uhlíku, které mají vliv na korozi. Limit pro obsah rozpuštěného kyslíku je dán z důvodu zamezení tokem urychlené koroze, mj. je známkou netěsnosti systému. Nízké limity pro obsah sodíku umožňují docílení dostatečné čistoty páry. Splnění limitu pro železo a měď je indikátorem dobrého chemického režimu, nedochází ke korozi materiálů.

Kotlová voda – limity pro kotlovou vodu jsou definovány pro systémy s bubnovým kotlem. EPRI i VGB doporučení definují limity pro parametry: pH, obsah fosfátů, specifická a katexovaná vodivost a obsah křemičitanů. Hodnota pH je základním parametrem pro řízení chemického režimu. Limit pro křemičitan v kotlové vodě je zaveden kvůli ochraně turbíny, kam se dostávají díky své těkavosti. EPRI doporučení navíc definuje limity pro obsah chloridů, síranů, sodíku, hydroxidu sodného a rozpuštěného kyslíku. Limity pro obsah chloridů a síranů zajišťují ochranu kotle před korozi.

Přehřátá pára – základními řídicími parametry páry jsou odplyněná katexovaná vodivost a obsah sodíku. Odplyněná katexovaná vodivost nepřímo odráží obsah aniontů a organického uhlíku (TOC), které mají vliv na tvorbu depozitů. Chloridy, sírany a TOC mají limity a předpis pro periodická měření. Sloučeniny sodíku podněcují korozi a jejich obsah by měl být maximálně minimalizován. Jako diagnostický parametr je definován obsah křemičitanů,

který odráží vznik nerozpustných depozitů na turbíně. VGB norma navíc definuje limity pro obsah železa a mědi.

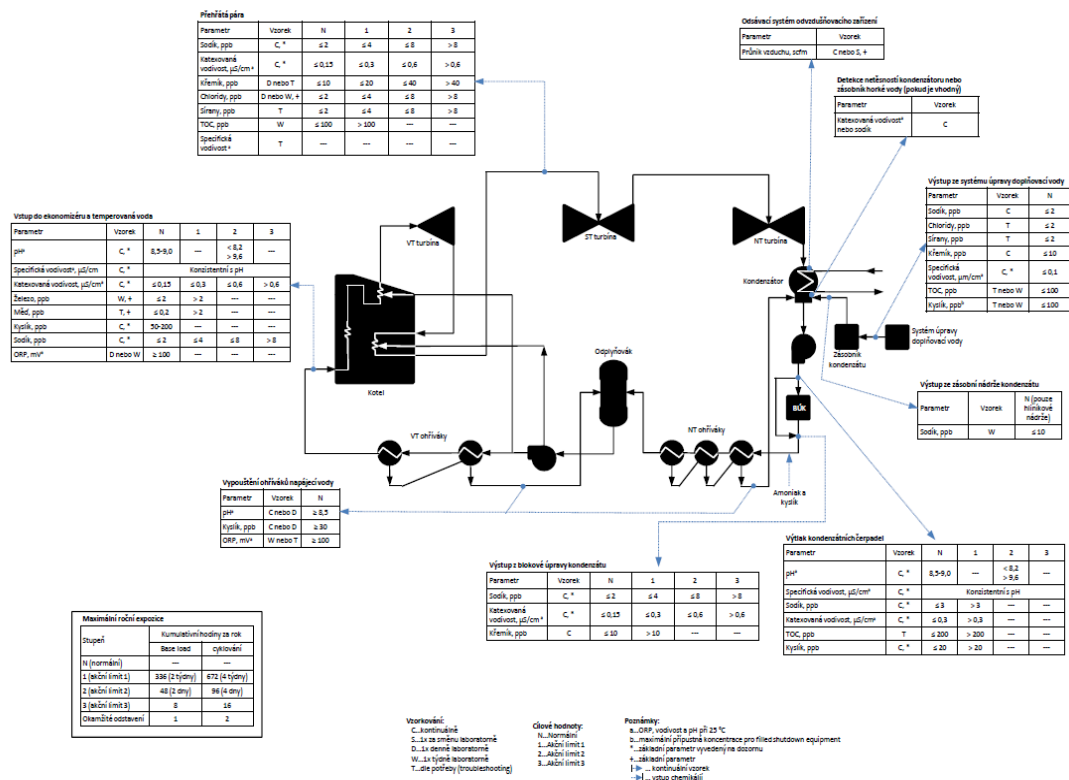
Závěr

Řízení a kontrola chemického režimu parovodního cyklu je jedním z důležitých faktorů zajišťujících optimální provoz. Optimální chemický režim si klade za cíle:

- minimalizace poškození teplosměnných trubek,
- žádné problémy na turbíně (lopatky, disky, úsady),
- minimalizace výskytu tokem urychlené koroze (FAC),
- optimalizovat neprovozní stavy (najíždění, odstavování, konzervace).

Literatura

- [1] Kobzová, A. (2017): Projekt VaV: Turbíny – vývoj metodiky kontrol lopatek s využitím informací z EPRI, Etapa M5A – Hodnocení chemického režimu za provozu a v přechodových stavech, technická zpráva ÚJV-2302/425 rev.1
- [2] EPRI guideline 1021767 (2011): *Comprehensive Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plant*
- [3] VGB-R 450Le (2004): *Guidelines for Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants/ Industrial Plants*, VGB PowerTech e.V.



Obr. 1: Schéma parovodního okruhu pro monitorovací systém

MIKROBIÁLNÍ SMYČKA – DLOUHODOBÝ TEST PRO EPRI

MICROBIAL LOOP – LONG-TERM TEST FOR EPRI

Dalibor Kárník, Alena Kobzová, Martin Krondřák a Helena Suchanová

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Mikrobiální nízkotlaká smyčka je experimentální zařízení umožňující dlouhodobé korozní testy konstrukčních materiálů v prostředí chladicích vod s možností biologického oživení. V posledních dvou letech proběhl dlouhodobý test pro EPRI zaměřený na korozi kovových materiálů v prostředí slané a sladké vody ovlivněné rychlostí proudění či bez proudění ve slepých ramenech zakopaných potrubí. Výsledky testů jsou jedním ze vstupů do další verze BPWorks, který se používá pro predikci kritických míst zakopaných potrubí.

Microbial low pressure loop is an experimental device that allows long-term corrosion testing of construction materials in a cooling water environment with the potential for biological recovery. In the last two years, a long-term EPRI test was conducted for the corrosion of metallic materials in salt and fresh water environments affected by flow velocity or without flowing in the death legs of buried pipes. The test results are one of the inputs to the next version of BPWorks, which is used to predict critical locations of buried pipelines.

1. Úvod

Potrubní systémy, ve kterých proudí surová, nebo jen minimálně upravená voda, jsou ohroženy korozi a vznikem tuberkul (korozních puchýřů). Tuberkuly mohou částečně nebo úplně bránit toku média, podporovat podnánosovou a štěrbinovou korozi, zvyšovat tření a náročnost čerpání vody apod. Tuberkuly mohou vznikat buď pomocí mikrobů, kdy mikroby uchycené na stěně zachytávají železo a další minerály z hlavního proudu, nebo obecnou korozi, kdy jsou korozní produkty zachyceny na stěně potrubí. Mezi materiály potrubí, o kterých je známo, že jsou ohroženy korozi, patří uhlíková ocel, litina a slitiny mědi. Nejvíce ohrožené jsou slepé části potrubí a části s přerušovaným nebo pomalým tokem.

Dosavadní znalosti faktorů, které ovlivňují tvorbu a růst tuberkul jsou stále poměrně omezené. Mezi významné faktory patří složení vody proudící potrubím, rychlost proudění, množství rozpuštěného kyslíku, teplota, materiál potrubí, orientace slepé části potrubí a promíchávání. Lepší znalost těchto faktorů by mohla vést k lepšímu určování a kontrole kritických míst v potrubí (včetně zdokonalení modelování v BPWorks). Cílem tohoto projektu je provést testy vedoucí k lepšímu porozumění vzniku tuberkul obecnou korozi (bez přítomnosti mikrobů) a z výsledků určit, kde je největší pravděpodobnost jejich výskytu a jak jejich vzniku nejlépe předcházet.

2. Experimentální zařízení

2.1. Testované materiály

Základním materiálem byla zvolena uhlíková ocel C15E o složení uvedeném v tabulce 1. Vzorky tohoto složení byly určeny pro hodnocení koroze na přímém potrubí, na slepých T-kusech potrubního systému a na přímém potrubí s různou rychlostí toku média. V menším rozsahu byly do zkoušky zařazeny materiály šedá litina EN-GJL-250, slitina Cu-Ni 70/30 (C-71500 ASTM B-151) a slitina Cu-Ni 90/10 (C-70600 ASTM B-151). Tyto tři materiály byly instalovány pouze na přímé části potrubí a při základní rychlosti toku média (1 m/s).

2.2. Zkušební zařízení

Pro expozici byla zvolena dvoukruhová vodní smyčka o objemu 2 x 750 l média s možností regulace průtoku a teploty (Obr. 1). Konstrukčním materiálem okruhů a zásobníků

nádrží je polypropylen. Zkušební sekce s instalovanými vzorky byly zkonstruovány z PMMA. Rychlost v základním potrubním systému smyčky a T-kusů o světlosti 100 mm byla zvolena 1 m/s. Pro studium korozních procesů při vyšší rychlosti proudění byly do okruhů instalovány rovné sekce o menší světlosti (60 mm pro rychlost proudění 2,8 m/s a 40 mm pro rychlost proudění 6,3 m/s). Slepá ramena byla zkonstruována v délkách 400 a 900 mm a s různou orientací (svisle nahoru, svisle dolů a vodorovně).

Na dvou paralelních vodních smyčkách byly provedeny dva experimenty. První probíhal v prostředí modelové sladké vody při teplotách 40 °C (okruh A) a 15 °C (okruh B) a druhý v prostředí modelové slané vody při teplotách 40 °C (okruh A) a 15 °C (okruh B). Složení modelových prostředí je uvedeno v tabulce 2. Obsah rozpuštěného kyslíku byl ponechán rovnovážný se vzduchem.

Celková plánovaná doba expozice jednoho experimentu byla zvolena 84 dní, přičemž vzorky pro analýzu korozního poškození byly odebírány vždy po 14 dnech.

3. Průběh experimentu a výsledky

3.1. Hodnocení průběhu experimentu

Teplota byla regulována od teplotních snímačů (odporové platinové teploměry) umístěných v zásobních nádržích a byla udržována s přesností ± 1 °C. V případě potřeby byly okruhy chlazeny přes výměník instalovaný v průtočné zásobní nádrži každého z okruhů. Jako zdroj tepla pro ohřev média na 40 °C byl většinou dostatečný hydrodynamický ohřev od chodu cirkulačních čerpadel.

V průběhu expozice byl periodicky měřen obsah rozpuštěného kyslíku optickou sondou WTW (FDO 70x IQ F). Podle očekávání byly zjištěny hodnoty blízké rovnovážným a s nevýznamným rozptylem hodnot (40 °C 6,13 - 6,33 ppm; 15 °C 9,34 - 9,67 ppm). V zaslepených T-kusech nebyla měření prováděna.

V průběhu měření obsahu rozpuštěného kyslíku v korozním médiu byl kontrolován vnitřní povrch víka zásobní nádrže a byl zjištěn vysoký stupeň oživení – na povrchu byla hmatem zjištěna slizká vrstva biofilmu. V nádrži s teplotou 40 °C byla vrstva biofilmu zjištěna prakticky okamžitě (48 hodin po startu experimentu), u nádrže s teplotou 15 °C byla při prvním měření vrstva subjektivně slabší, při dalších měřeních (po 10 dnech provozu) byla situace v obou nádržích subjektivně shodná.

3.2. Hodnocení korozních zkoušek na přímém potrubí

U uhlíkové oceli je jednoznačně zřetelná orientace korozních vrstev ve směru proudění pro mořskou vodu již od 2,8 m/s a pro sladkou vodu při 15 °C od 6,3 m/s a při 40 °C od 2,8 m/s. Korozní úbytky a korozní rychlosti vykazují s dobou experimentu mírný pokles, ukazující na nezanedbatelný ochranný účinek korozní vrstvy. Tento efekt je výraznější v případě sladké vody, u mořské vody při 40 °C je efekt potlačen a korozní rychlost má při vysoké rychlosti proudění s časem dokonce rostoucí tendenci.

Největší korozní napadení ve sladké vodě bylo zjištěno u šedé litiny a v mořské vodě u uhlíkové oceli. Koroze šedé litiny probíhala relativně rovnoměrně po celém exponovaném povrchu, a to i v prostředí mořské vody. U uhlíkové oceli byla koroze méně rovnoměrná. Korozní rychlosti šedé litiny i uhlíkové oceli v mořské vodě při 40 °C dosahovaly velmi vysokých hodnot a nebyl zde patrný ochranný vliv vzniklé korozní vrstvy.

Korozní odolnost obou typů měděných slitin byla výrazně vyšší, ve sladké vodě byly korozní úbytky blízké nule. V mořské vodě se v obou případech korozní rychlost pohybovala pod hranicí 0,15 mm/rok. U těchto slitin bylo patrné korozní poškození mechanismem důlkové koroze. Výrazné bylo zejména u materiálu Cu-Ni 90/10 při 40 °C, méně při 15 °C, u materiálu Cu-Ni 70/30 jsou důlky po expozici při 15 °C.

Pro zjištění vlivu obvodové orientace korozních vzorků na rychlost koroze byly instalovány v přímých úsecích smyčky vzorky po obvodu potrubí. Tyto vzorky byly vyjmuty a analyzovány na konci experimentu. Ze získaných dat nelze potvrdit ani vyvrátit předpokládanou vyšší korozní rychlost u vzorků v dolní poloze a vzorků ve směru vně okruhu.

3.3. Hodnocení korozních zkoušek na zaslepených T-kusech

Faktorem, který významně ovlivňuje korozní děje v zaslepených T-kusech, je změna teploty a s ní spojený obsah rozpuštěného kyslíku v dlouhých, a to především vertikálně orientovaných T-kusech, kde dochází ke stratifikaci na základě hustot.

Průběh korozních rychlostí v lokalitě zaslepeného T-kusu ve sladké vodě má klesající charakter jak při teplotě 15 °C, tak při 40 °C. Tvořící se korozní produkty mají částečně ochranný charakter a v počátečních fázích korozního procesu korozi zpomalují. Výsledné hodnoty korozních rychlostí v jednotlivých typech T-kusů se pro teplotu 15 °C liší jen málo, typickou je hodnota kolem 0,12 mm/rok. V případě média o teplotě 40 °C je výsledný rozptyl větší, mezi 0,06 a 0,15 mm/rok. Nejnižší korozní rychlost byla zaznamenána u dlouhého T-kusu s orientací dolů, kde lze předpokládat nejnižší teplotu. Ve všech případech není patrný příliš významný rozdíl mezi dlouhými a krátkými T-kusy.

Průběh korozních rychlostí v lokalitě zaslepeného T-kusu v mořské vodě má při teplotě 15°C klesající charakter podobně jako ve vodě sladké. I hodnota korozní rychlosti je ve většině lokalit podobná. Zřetelně odchylený je průběh korozní rychlosti v lokalitě dlouhého T-kusu s orientací vzhůru, kde je hodnota korozní rychlosti téměř dvojnásobná. Lze předpokládat, že důvodem je vyšší teplota média vlivem gravitační stratifikace.

V případě mořské vody s teplotou 40 °C jsou nejvyšší korozní úbytky u krátkých T-kusů. Důvodem je opět vyšší teplota oproti dlouhým T-kusům, kde jsou větší tepelné ztráty.

4. Diskuze

Získané experimentální výsledky jsou ovlivněny z pohledu korozních procesů velmi krátkou dobou expozice. Modelování reálných podmínek na laboratorním zařízení poloprovodní velikosti s omezeným objemem modelového pracovního média je velmi komplikované zvláště v případě významné účasti mikrobiologicky ovlivněných korozních procesů. Přesto jsou v získaných výsledcích zřejmé jisté trendy, které lze považovat za natolik obecné, že jejich uplatnění lze očekávat i v reálných provozních podmínkách.

Relativně malý objem a částečně uzavřený systém experimentální vodní smyčky limituje délku korozních experimentů – v průběhu času dochází k selektivnímu růstu pouze některých mikroorganismů a ke vzniku prostředí z mikrobiologického pohledu výrazně odlišného od provozních okruhů, kde je mikrobiologické oživení do značné míry stabilní (s pochopitelnými sezonními výkyvy).

5. Závěr

- Okruhy k monitorování koroze instalované na skutečných chladicích okruzích musí umožňovat uchovávání vzorků po dobu delší než jeden rok.
- Chování ve slepých T-kusech je odlišné od hlavního toku. Závisí také na orientaci.
- Rychlost koroze ovlivňuje koncentrace rozpuštěného kyslíku, která závisí na teplotě.
- Slaná voda je agresivnější než sladká voda.
- Odolnost proti korozi testovaných materiálů je podle očekávání.

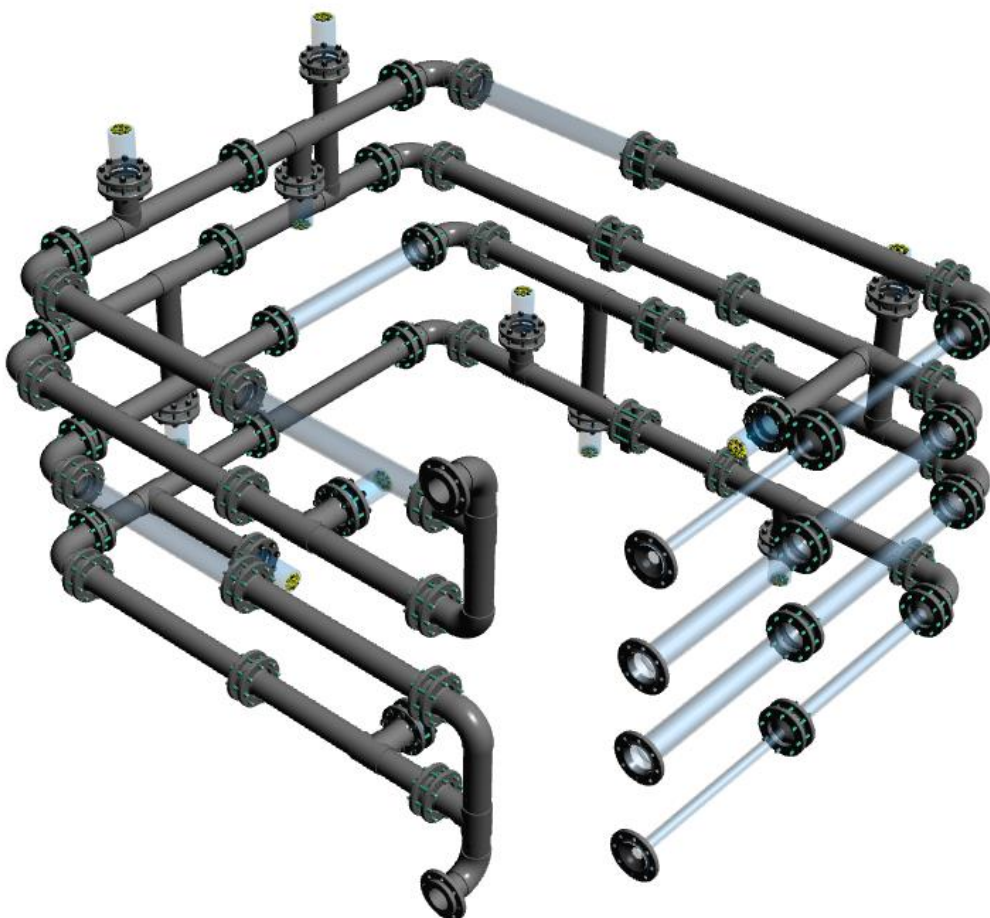
Tabulky a obrázky

Tabulka 1 Složení uhlíkové oceli C15E

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,12-0,19	0,35-0,65	0,15-0,40	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040

Tabulka 2 Složení modelových prostředí přírodní a mořské vody v porovnání s limity

Prvek/ Obsah (mg/l)	Cl-	Na+	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	pH (1)	Vodivos t (μS/cm)	Celk. tvrd.	Ca tvrd.	Mg tvrd.	Celk Alkal
Modelová sladká voda	11,7	52	12	127,6	40	7,00	489	150	100	50	110
Limity EPRI	5- 1000	-	-	5-200	-	6,5- 8,5	150- 2000	5-300	3- 200	2-100	2-350
Modelová mořská voda	19357	326	158, 4	904	168	7,70	50300	1080	420	660	720
Limity EPRI	>2500	-	-	50- 1000	-	7-8,5	>4000	50- 2000	30- 800	20- 1200	20- 800



Obr. 1 Schéma dvou autonomních okruhů vodní smyčky

METODY AKTIVNÍ TERMOGRAFIE PRO PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBU ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

ACTIVE THERMOGRAPHY METHODS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF POWER EQUIPMENT

Michal Švantner, Lukáš Muzika, Jiří Skála a Jiří Tesař

Západočeská univerzita v Plzni

Abstrakt

CZ: V příspěvku je představena aktivní termografie a její metody. Její možnosti využití jsou ukázány na příkladu inspekce ocelových stěn a příkladu hodnocení součástí při cyklickém zatížení. Jsou představeny možnosti využití lock-in a step/transient termografie s buzením pomocí halogenových lamp pro inspekci korozního úbytku ocelových stěn. Na druhém příkladu jsou ukázány možnosti využití termografie s rozšířeným vyhodnocením pomocí Fourierovy analýzy pro detekci poškození součástí při cyklickém zatížení.

EN: Active thermography and its approaches are introduced in this contribution. Possibilities of active thermography are demonstrated on two examples – inspection of steel walls and inspection of components at cyclic loading. Example of an inspection of a corrosion loss at rear side of steel walls by halogen lock-in and step/transient thermography is presented. Second example shows possibilities of thermography with an advanced evaluation using Fourier analysis for a damage inspection of a component under cyclic loading.

Aktivní termografie - úvod

Aktivní termografie je metoda infračerveného nedestruktivního testování (IRNDT), která využívá externího buzení zkoušené součásti. Buzení způsobí tepelný proces, který je defekty nebo tepelně-mechanickými procesy v součásti ovlivněn. To způsobí tepelnou odezvu součásti, kterou lze sledovat pomocí termografického měření. Následnou analýzou této odezvy pak lze zjišťovat výskyt defektů, materiálových nehomogenit nebo lokalizace probíhajících tepelně-mechanických dějů v blízkosti povrchu testované součásti. Standardními metodami IRNDT [1,2] jsou zejména externí buzení pomocí pulzních, periodických nebo skokových zdrojů ve spojení s vyhodnocením pomocí pokročilých metod, jako je např. pulse-phase nebo lock-in termografie. Specifické aplikace pak využívají metod interního buzení. Jedná se např. o metody excitace pomocí ultrazvuku nebo mechanického namáhání pro TSR analýzu (termografickou analýzu tepelně-mechanických jevů) nebo pro termografickou analýzu únavových vlastností [3].

Příklady využití termografické inspekce

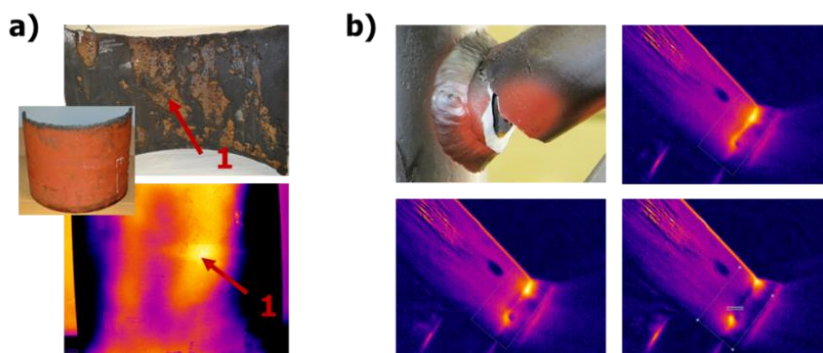
V provozech energetických zařízení se vyskytují případy, kdy vlivem prostředí dochází ke korozi na skryté straně ocelových stěn. Jedná se např. o vnitřní části potrubí nebo ocelové výstelky. Korozní napadení může v dlouhodobém horizontu vést k masivnímu úbytku tloušťky stěn, proto je z bezpečnostních i technologických důvodů nutné provádět pravidelnou kontrolu takových zařízení. Standardní defektoskopické metody, např. ultrazvuk, nabízejí dostatečnou přesnost měření, umožňují ale zejména lokální analýzy. Provedené testy prokázaly, že v některých případech je možné využít termografické techniky k plošné analýze úbytku tloušťky ocelových stěn. Pro tyto analýzy se hodí zejména lock-in nebo step/transient termografie s buzením pomocí halogenových lamp, které nabízí dostatečnou flexibilitu použití při potřebném výkonu budicího zdroje (jsou ovšem publikovány i příspěvky popisující využití flash-pulse metod). Na obr. 1 a) je ukázán příklad výsledků IRNDT inspekce (tzv. defektogram) při buzení halogenovou lampou a použití step/transient analýzy na vzorku

ocelové trubky o tloušťce 10 mm s výrazným úbytkem tloušťky, který v některých místech dosahuje až 50 % původní tloušťky stěny.

Termografická analýza součástí při cyklickém zatížení má uplatnění v případech laboratorních i technologických únavových testů (RIFT – Rapid Infrared Fatigue Testing), kdy je materiál namáhán pod mezí kluzu a sleduje se vliv procesu na jeho dlouhodobou tepelnou odezvu. Druhou skupinou využití jsou aplikace, kdy se zkoumá okamžité tepelně mechanické chování materiálu. Při těchto testech se sleduje intenzita a lokalizace tepelné odezvy v důsledku okamžitých mechanických procesů, zejména plastické deformace. Tyto testy lze využít např. pro technologické zkoušky nebo pro dlouhodobé sledování cyklicky namáhaných součástí. Na obr. 1 b) jsou ukázány defektogramy z termovizní inspekce cyklicky namáhané svařené součásti. Pro vyhodnocení byly v tomto případě využity některé postupy pulse-phase termografie s amplitudovým vyhodnocením. Na defektogramech je pak jasně patrné místo s lokalizací plastické deformace, kde následně došlo k vytvoření a postupnému rozvoji trhliny.

Závěr

V příspěvku byly představeny metody aktivní termografie – infračerveného nedestruktivního testování a ukázány možnosti jejich využití pro inspekci energetických zařízení. Příklady ukazují, že i přes některé obecné nevýhody termografie může být termografické testování s využitím pokročilých metod vyhodnocení užitečným diagnostickým nástrojem, zejména díky své bezkontaktní povaze a možnostem plošného zobrazení. To se jeví jako zásadní výhoda hlavně v případech, kde není předem známá poloha defektu a uplatnění lokálních metod inspekce je tak komplikované.



Obr. 1: Příklady defektogramů termografické analýzy: a) inspekce korozního úbytku na vnitřní straně ocelových stěn, b) rozvoj trhliny při cyklickém zatížení součásti.

Literatura

- [1] X. P. V. Maldague (2001), *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley
- [2] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes (2014), “*Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*,” *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 12305–12348,.
- [3] G. La Rosa and A. Risitano (2000), “*Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*,” *Int. J. Fatigue*, vol. 22, no. 1, pp. 65–73.

MECHANICKÉ A STRUKTURNÍ VLASTNOSTI ORBITÁLNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ Z OCELÍ P91 A P92 PO DLOUHODOBÉ LABORATORNÍ DEGRADACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT

MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF NARROW GAP ORBITAL WELDED P91 AND P92 STEELS AFTER LONG-TERM LABORATORY AGEING AT ELEVATED TEMPERATURES

Michal Junek^{a)b)}, Marie Svobodová^{a)}, Ladislav Horváth^{a)} a Jiří Janovec^{b)}

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

^{b)} Ústav materiálového inženýrství FS ČVUT v Praze, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

Abstrakt

Příspěvek se zabývá hodnocením mechanických a strukturních vlastností homogenních a heterogenních orbitálních svarových spojů do úzkého úkosu z martenzitických ocelí P91 a P92 po dlouhodobém laboratorním degradačním žihání za zvýšených teplot až 700 °C po dobu až 30 000 hodin. Výstupem tohoto hodnocení jsou kinetické závislosti změn strukturních a mechanických vlastností během teplotního namáhání.

This paper deals with an evaluation of mechanical properties and microstructures of similar and dissimilar narrow gap orbital welds of martensitic P91 and P92 steels after long-term laboratory ageing at elevated temperatures (up to 700 °C for up to 30 000 hours). As a conclusion of this assessment, the kinetic dependencies of structure and mechanical properties changes during long-term exposure at high temperatures are presented.

Úvod

Hlavním rozdílem mezi ručním a orbitálním procesem svařování je výrazné zkrácení strojních časů (příprava svarových ploch a proces svařování), a to přibližně o 20 až 30%. Z čehož plyne, že celková velikost vnesené tepelné energie a průběh teplotního pole jsou odlišné. Pokud použijeme v literatuře často používané zobrazení závislosti mezi místem svarového spoje a fázovým diagramem, musíme předpokládat rozdílné šířky jednotlivých tepelně ovlivněných zón dané jiným průběhem nestacionárního teplotního pole při svařování.

Z pohledu normou předepsaných zkoušek je jak ruční, tak orbitální svařování zvládnuto. Co ale pro volbu použité technologie chybí, jsou podklady o chování orbitálních svarů po dlouhodobé teplotní expozici.

Experimentální materiál

Orbitální homogenní svarový spoj do úzkého úkosu oceli P91 (OD 355 x 40 mm) byl svařen v poloze PK a PC a následně tepelně zpracován v peci 755 °C/3 h. Orbitální heterogenní svarový spoj ocelí P91/P92 parovodní trubky o rozměrech OD 324 x 28 mm z oceli P91 a parovodní trubky o rozměrech OD 330 x 55 mm z oceli P92 (která byla obrobena na rozměry OD 324 x 28 mm) byl svařen taktéž v poloze PK a PC a následně tepelně zpracován v peci 760 °C/3 h.

Výše uvedené svarové spoje byly vystaveny laboratornímu degradačnímu žihání na vzduchu v elektrických odporových pecích, viz Tab. 1.

Mikrostrukturní rozbor

Degradační žihání při teplotě 650 °C po dobu až 30 000 hodin nemělo výrazný vliv na strukturní vlastnosti jednotlivých oblastí homogenních a heterogenních svarových spojů. Svarové kovy (SK) jsou tvořeny výrazněji popuštěnou martenzitickou mikrostrukturou,

mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO) homogenního svarového spoje je pozvolná bez výrazných hranic mezi jednotlivými pásmy. Naopak u heterogenního svarového spoje se v TOO na straně oceli P91 po 30 000 hodinách expozice začínají objevovat zhrublé oblasti tvořené čistě feritickým zrnem pouze s karbidickou disperzí, viz Obr. 1.

Naopak degradační žíhání za vyšších teplot 675 a 700 °C již po době expozice 12 600 hodin způsobilo výrazné popuštění martenzitické struktury jak v oblasti SK, tak v pásmu přehřátí TOO. Tyto oblasti jsou tvořeny čistě feritickým zrnem (s velikostí původního austenitického zrna) s karbidickou precipitací a patrnými řádky karbidů/ δ feritu ve struktuře oceli P92, viz Obr. 2. Zároveň došlo k výraznému zhrubnutí částic (patrně karbidu typu M23C6) na hranicích zrn, a to ve všech oblastech svarových spojů nezávisle na tom, zda jde o homogenní či heterogenní svar.

Mechanické vlastnosti

V případě průběhů tvrdostí po degradačním žíhání při teplotě 650 °C po dobu 12 600 h a 30 000 h nejvyšších hodnot vždy dosahuje svarový kov, naopak nejnižších interkritická oblast na rozhraní mezi pásmem částečné překrytosti a základním materiálem. Po 30 000 hodinách dojde k popuštění martenzitické matrice SK až na hodnoty 237 HV10 z původních 287 HV10. Naopak při degradačním žíhání na teplotě 700 °C došlo již po expozici 12 600 hodin k poklesu tvrdosti SK pod základní materiál i TOO, kdy tvrdost SK poklesla až na hodnoty 133 HV10.

Výsledky zkoušek tahem při teplotě 20 a 600 °C korespondují s výsledky měření tvrdostí. V případě degradačních teplot 650 a 675 °C docházelo k lomu vždy na straně oceli P91 s lomem typu IV. Naopak po degradační expozici na teplotě 700 °C došlo k lomu vždy v SK.

Kinetické závislosti materiálových vlastností

Zjištěné mechanické vlastnosti pro různé stavy degradace (teplota a čas) byly zpracovány v závislosti na hodnotě Larsonova-Millerova parametru (LMP), viz Obr. 3. Podle postupu popsaného v [1] byla zvolena Larsonova-Millerova konstrukce s konstantou $C = 18,2$. Z uvedených grafů (Obr. 3) je patrné, že vyšší teploty degradace (vyšší hodnoty LMP) způsobují výrazný pokles hodnot meze kluzu, meze pevnosti, kontrakce a tvrdosti svarového kovu [2].

Závěr

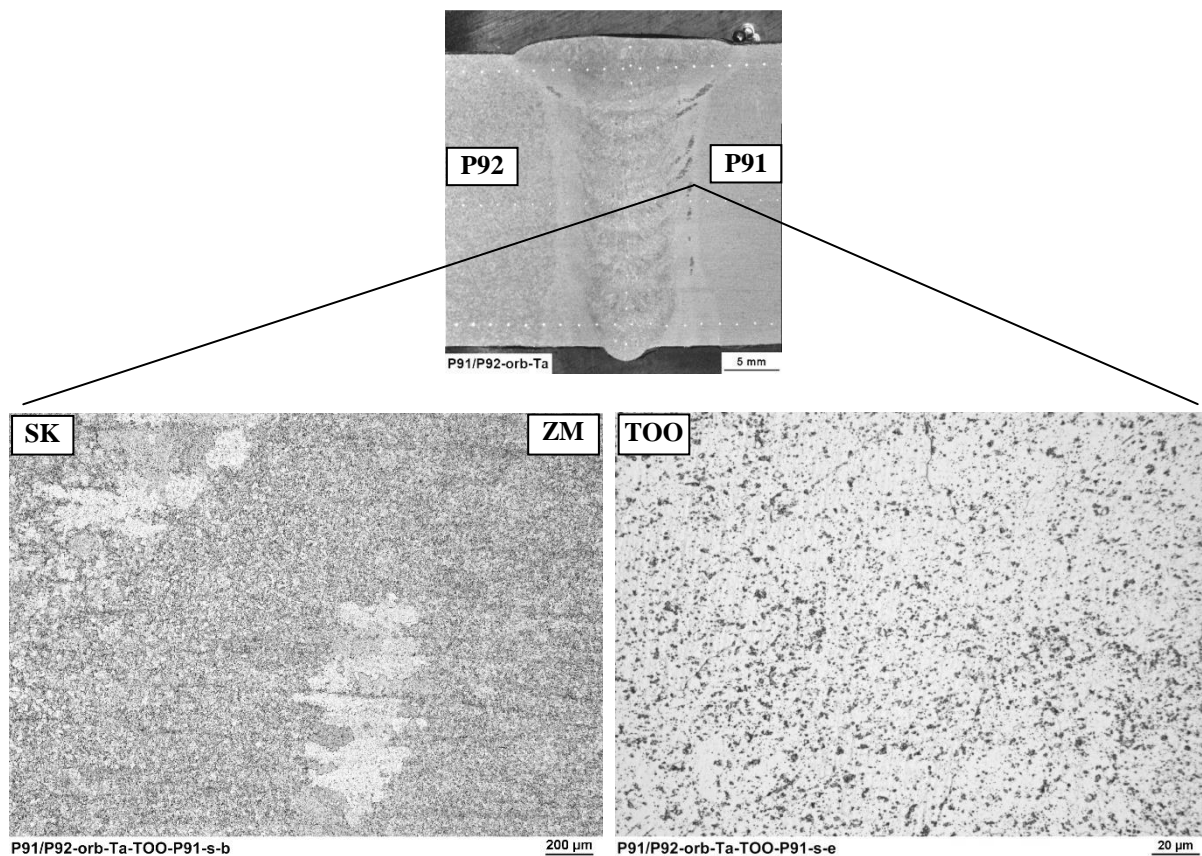
Degradační teplota 650 °C způsobila nevýrazný pokles pevnostních charakteristik o (20 až 30) MPa. Naopak expoziční teplota 700 °C zcela mění mechanické vlastnosti svarového spoje nezávisle na tom, zda jde o homogenní či heterogenní svar. Mez kluzu a mez pevnosti klesla o více jak 130 MPa (při teplotě 20 °C), resp. 50 MPa (při teplotě 600 °C), a místo lomu se přesouvá z interkritického pásma oceli P91 do svarového kovu. Což je důsledkem mikrostrukturních změn, výrazným popuštěním martenzitické mikrostruktury na čistě feritické oblasti s karbidickou precipitací. Přesun nejkritičtějšího místa svarových spojů je navíc doprovázen také změnou vzhledu lomové plochy tahových i rázových těles.

Poděkování

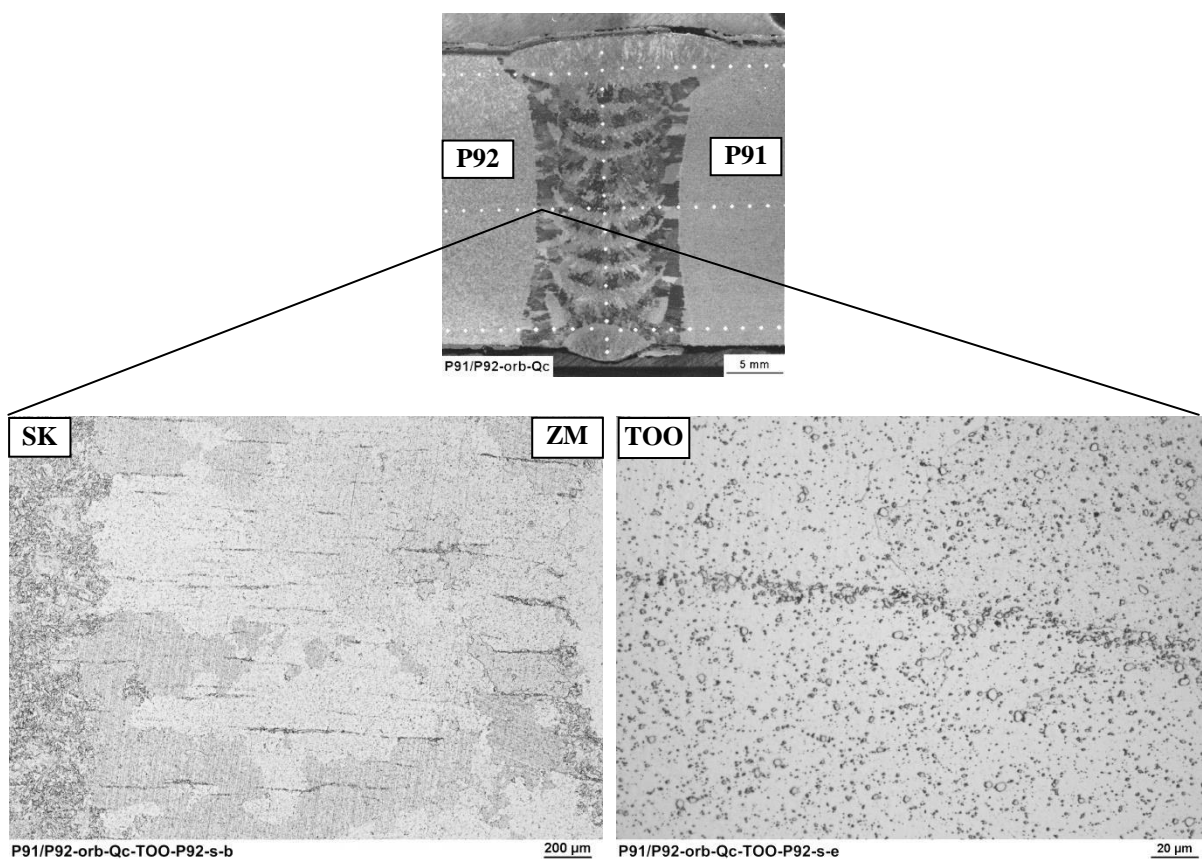
Tento příspěvek vznikl za finanční podpory TAČR při řešení projektu TH02020295, za podpory MPO ČR při řešení projektu č. FR-TI4/406 programu TIP 4 a za podpory studentské grantové soutěže ČVUT při řešení grantu č. SGS16/215/OHK2/3T/12.

Literatura

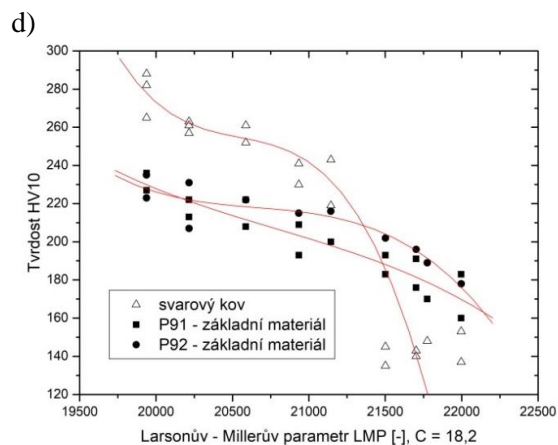
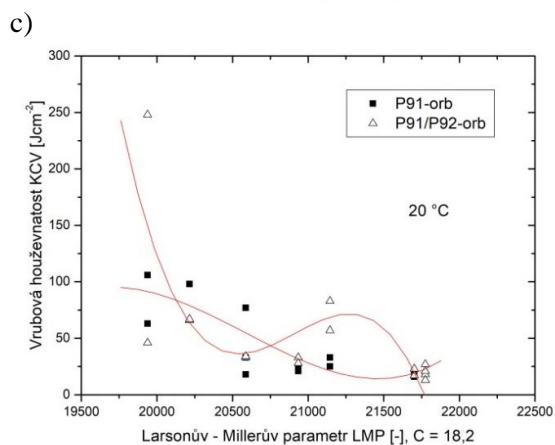
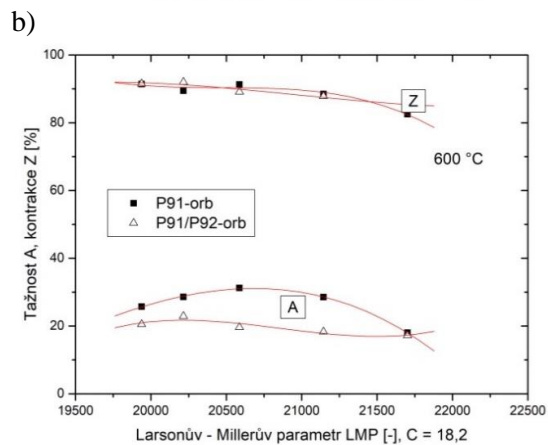
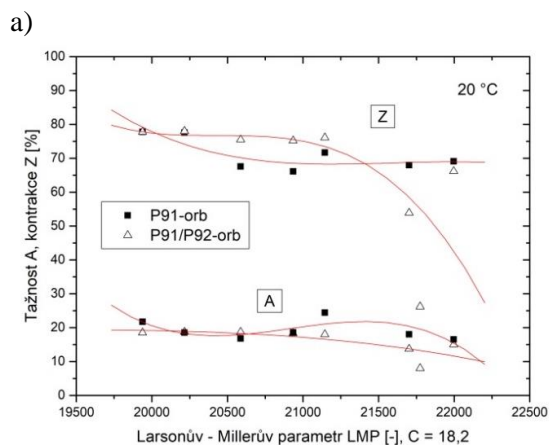
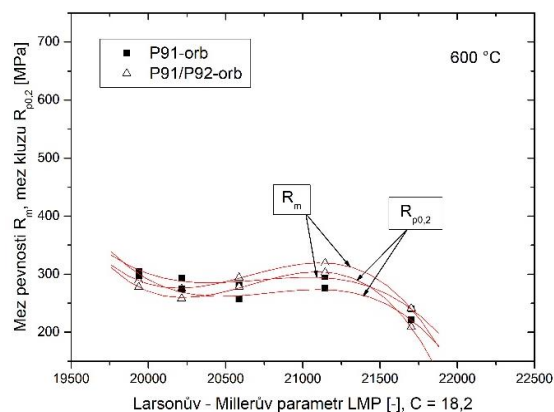
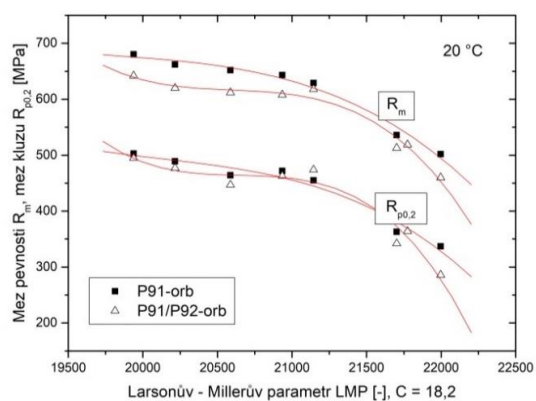
- [1] Svobodová, M.: „*Strukturní stabilita modifikované žárovečné oceli za zvýšených teplot*“. Disertační práce. Katedra materiálů FJFI ČVUT v Praze, Praha, duben 2011.
- [2] Horváth, L., Svobodová, M., Junek, M., Chmela, T., Horváth, J. (2016): *Zpráva UJP 1687 – závěrečná zpráva příjemce projektu FR-TI4/406*. Praha: UJP PRAHA a.s.



Obr. 1. Makrostruktura a mikrostruktura heterogenního orbitálního svarového spoje P91/P92 po laboratorní expozici při teplotě 650 °C po dobu 30 000 hodin



Obr. 2. Makrostruktura a mikrostruktura heterogenního orbitálního svarového spoje P91/P92 po laboratorní expozici při teplotě 700 °C po dobu 25 000 hodin



Obr. 3. Kinetické závislosti materiálových vlastností: a), b) mez pevnosti a mez kluzu při 20 a 600 °C, c), d) tažnost a kontrakce při 20 a 600 °C, e) KCV při 20 °C, f) tvrdost [2]

Tab. 1: Laboratorní expozice orbitálních svarových spojů

Materiál	Teplota [°C]	Doba expozice [h]
Homogenní orbitální svar P91/P91	650	5 000, 12 600, 30 000
	675	12 600, 30 000
	700	12 600, 25 000
Heterogenní orbitální svar P91/P92	650	5 000, 12 600, 30 000
	675	12 600, 30 000
	700	12 600, 15 000, 25 000

SILIKONOVÉ REPLIKY – NEPŘÍMÁ METODA HODNOCENÍ POŠKOZENÍ KOMPONENT

SILICONE REPLICAS – INDIRECT METHOD TO EVALUATE DAMAGE OF COMPONENTS

Petr Brabec

ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt

Odběr silikonových replik umožňuje inspekci povrchu komponent provozovaných energetických zařízení nedestruktivní cestou, bez zásahu do jejich integrity. Charakteristiky originálních povrchů jsou následně hodnoceny laboratorně bez omezení daných specifiky provozních prostředí. Vysoká rozlišovací schopnost silikonové hmoty zachycuje detaily v rozměrech od méně než 0,1 mikrometru. Využití replik je prezentováno na příkladech dokumentace nálezů na komponentách JE typu VVER.

The silicone replica sampling allows non-destructive assessment of engineering surfaces without any affect to the integrity of operated systems. The characteristics of the original surfaces could be evaluated via replicas in the laboratory, without any limitation by the specifics of the field condition. The two-part polymer materials are able to replicate detail with dimensions less than 0.1 micrometer. The application of silicone replica method is presented on examples from inspection of VVER-type NPP components.

Úvod

Při řešení projektů z oblasti hodnocení stavu komponent provozovaných energetických zařízení je velmi často nežádoucí použití metod, které představují jakýkoliv mechanický zásah do posuzovaného tělesa nebo metod, které představují riziko chemické kontaminace povrchu nebo provozního prostředí. V oblasti hodnocení kvality povrchu komponent, dokumentace vad a provozních defektů má ÚJV Řež, a. s. dlouholeté zkušenosti s využitím metody silikonových replik. Jednou z důležitých výhod metody snímání otisků zájmových oblastí povrchu komponenty je zkrácení pracovního času potřebného pro řešení úkolu přímo v provozním prostředí, což vedle vlivu na zefektivnění odstávkového času vede i ke snížení expozice pracovníků v případě zdraví škodlivého prostředí. Metoda replik částečně umožňuje přesunutí detailního hodnocení stavu komponent do prostředí laboratoře.

Popis metody silikonových replik

K odběru replik s vysokým rozlišením detailů otisku je používána komerčně dodávaná aplikační sada, skládající se z ručně ovládané dávkovací pistole, do které se vkládá zásobník dvousložkové hmoty. Standardně jsou dostupné aplikační sady pro zásobníky o objemu 50 ml, 265 ml a 495 ml. Při aplikaci hmoty dochází ve slučovači k promíchání hmoty s katalyzátorem. Podle okolností odběru můžeme zvolit typ směsi s různou dobou aplikovatelnosti a vytvrditelnosti. V praxi je možné využít spektra směsí s možností sejmutí vytvrzené repliky po 4 až 210 minutách. Složení směsí odráží různé požadavky na jejich vlastnosti dané specifiky prostředí a geometrií odběru. Díky tomu lze odebírat repliky z hlubokých dutin, svislých stěn i z lokalit umístěných nad hlavou operátora. Překážkou nejsou ani povrchy spočívající pod vodní hladinou. Rozsah teplotní aplikovatelnosti metodiky replik sahá od -10°C po +180°C. Rychlost polymerace směsí se zvyšuje s rostoucí teplotou, což je třeba mít na zřeteli při výběru směsi vhodné pro předpokládanou teplotu prostředí odběru. Podle okolností odběru, tedy dle specifik povrchů nebo jejich obtížné dostupnosti, je možné odběr umožnit, případně usnadnit použitím rozličných nástavců na aplikační trysku, které například pomáhají aplikaci hmoty v úzkých dutinách nebo uvnitř trubek.

Rychle tuhnoucí polymerní silikonová hmota byla navržena speciálně pro účely odběru replik. Směsi o různé viskozitě a době polymerace umožňují široký rozsah použití. Vlastnosti pozvolna se rozlévající hmoty minimalizují nežádoucí záchyt vzduchových bublin ve výsledné replice a umožňují snadnou aplikaci i na rozměrných plochách. Silikonová směs má schopnost přenést topografii pevného povrchu v rozlišení až 0,1 mikrometru do podoby pružné a stabilní repliky. Výsledkem je tak 3D kopie původního povrchu, umožňující mikroskopická hodnocení a přesná měření v laboratorním prostředí. Repliky vykazují po plném vytvrzení dlouhodobou rozměrovou stabilitu bez smršťování. Po vytvrzení se silikonové repliky snadno oddělují od dokumentovaných povrchů. Díky vysoké odolnosti vůči roztržení a elasticitě je možné sejmout otisk i z dutin, které se pod povrchem mírně rozšiřují do stran. Dočasná deformace repliky při snímání z členitých povrchů neovlivňuje díky elastomerním vlastnostem hmoty výsledný tvar otisku, který vždy odpovídá originálu.

Silikonové repliky mohou být snímány z většiny pevných neporézních povrchů. Metoda je určena především pro kovové materiály, je však aplikovatelná rovněž na keramiku, plasty a sklo. Metoda nemá omezení ohledně velikosti, tvaru ani tloušťky odebíraných otisků. Používaná hmota neobsahuje chlór, síru a neuvolňuje žádná rozpouštědla. Jedná se o metodu splňující požadavky ASTM normy E1351: „Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas“. Hmota používaná pro metodu silikonových replik je schválená pro používání v jaderných elektrárnách. Je prokázáno, že nemůže iniciovat korozní degradaci ocelových komponent.

Odběrem repliky ve skutečnosti získáváme negativní otisk originálního povrchu. Pro následné hodnocení je v řadě případů výhodou vytvoření pozitivního otisku tzv. repliky z repliky. Pozitivní otisk může být vytvořen ze silikonového materiálu nebo jako epoxidový odlitek.

V případech, kdy není požadováno maximální rozlišení repliky a v situacích, kde je třeba vytvořit rozměrnější otisk, je možné použít alternativní komerčně nabízený produkt v podobě ručně mísitelné dvousložkové hmoty (max. rozlišení 10 mikrometrů). Výhodou obou směsí je, že po aplikaci drží pohromadě v pevném spojení, což dovoluje obě hmoty vhodně kombinovat.

Metoda silikonových replik dovoluje rovněž metalografické hodnocení materiálů komponent a představuje tak alternativu k odběru klasických metalografických replik typu Transcopy. Pro tento účel je určena speciální směs s rozlišením 0,05 mikrometru, která je dodávána ve standardních zásobnících pro aplikační pistoli a nanášena na náležitě připravený povrch komponenty.

Vlastnosti silikonových replik umožňují hodnocení oblastí zájmu reálných komponent energetických zařízení pomocí laboratorních přístrojů. Repliky jsou dokumentovány pomocí stereomikroskopie, odrazové mikroskopie, rastrovací elektronové mikroskopie a dalších zobrazovacích metod. 3D hodnocení a měření je možné pomocí bezkontaktních např. laserových metod. Měřicí přístroje s kontaktní sondou mohou být vzhledem k pružnosti replik aplikovány pouze na pevné otisky z epoxidové pryskyřice, vytvořené metodou repliky z repliky.

Metoda replik skýtá možnosti širokého spektra využití v oblasti kontroly kvality výroby, technických kontrol průmyslových zařízení, údržby, oprav a analýzy poškození komponent. Mezi typické aplikace metody silikonových replik patří:

- detekce a monitoring pittingu, korozního poškození, přítomnosti trhlin, dokumentace lomových ploch trhlin, výskyt creepu, deformace a provozní opotřebení komponent

- kontrola obtížně přístupných vnitřních povrchů (např. závitové otvory, kořenové svary trubek malých průměrů)
- rozměrová kontrola kvality (hrany, tloušťky, úhly, drsnost povrchů, profily závitů)
- hodnocení mikrostruktury a jejích změn

V následujících několika příkladech jsou demonstrovány možnosti využití metody silikonových replik při hodnocení stavu komponent provozovaných jaderných elektráren typu VVER.

Trhliny na vyjímatelné části hlavního cirkulačního čerpadla (HCČ) primárního okruhu

V několika případech byl řešen výskyt trhlin na různých místech tělesa vyjímatelné části hlavního cirkulačního čerpadla. Výběr metod hodnocení nálezu byl omezen na nedestruktivní postupy. Vedle vizuální a kapilární metody byla využita metoda silikonových a extrakčních uhlíkových replik. V oblasti indikací odhalených kapilární zkouškou byla pomocí thixotropní směsi aplikovatelné i na svislé povrchy odebrána série silikonových replik. Studium silikonových replik byl dokumentován charakter průběhu trhlin, jejich délka a tloušťka (odpovídá rozevření ústí trhliny). Na podkladě výsledků analýzy úsad (extrakční repliky), tvaru a charakteru šíření trhlin (silikonové repliky) bylo identifikováno korozní praskání jako příčina vzniku a šíření trhlin (obr. 1).

Studiem silikonových otisků čela šíření lineárních trhlin z oblasti tepelné bariéry HCČ ošetřených rázovým vtiskem byla zjištěna nežádoucí nepřesnost vtisků. Lokalizace vtisků byla primárně určena podle zobrazení průběhu trhliny kapilární metodou, která nedokáže s dostatečným rozlišením určit čelo trhliny. Bylo vydáno doporučení na používání silikonových replik, které jsou schopny čelo trhliny určit s vyhovující přesností.

Hubený kořen obvodového svaru na potrubí přívodu z kompenzátoru objemu

V rámci kontroly hubeného kořene svaru potrubní trasy světlosti DN 200 byly odebrány navazující repliky, dokumentující celý průběh svarového spoje na vnitřním obvodu potrubí. Cílem laboratorního hodnocení replik bylo stanovení maximální hloubky hubeného kořene. Nejprve bylo provedeno vyrovnání podkladové plochy originální repliky dodatkem přidavného materiálu. Výsledkem byla replika s podkladovou plochou rovnoběžnou s otiskem vnitřní stěny potrubí. Následně byly z vytipovaných oblastí originálních replik sejmuty repliky z repliky, čímž jsme získali pozitivní otisk objektu (silikonový model svaru). Pro účely měření maximálního převýšení digitálním úchytkoměrem s kontaktní sondou byl ze silikonového pozitivního otisku vytvořen pevný otisk z epoxidové pryskyřice. Na epoxidovém negativním otisku svaru bylo provedeno stanovení maximálních hloubek hubeného kořenu prostřednictvím měření převýšení „hřbetu“ svaru (negativ) vůči otisku vnitřního povrchu potrubí a to z obou stran spoje (obr. 2).

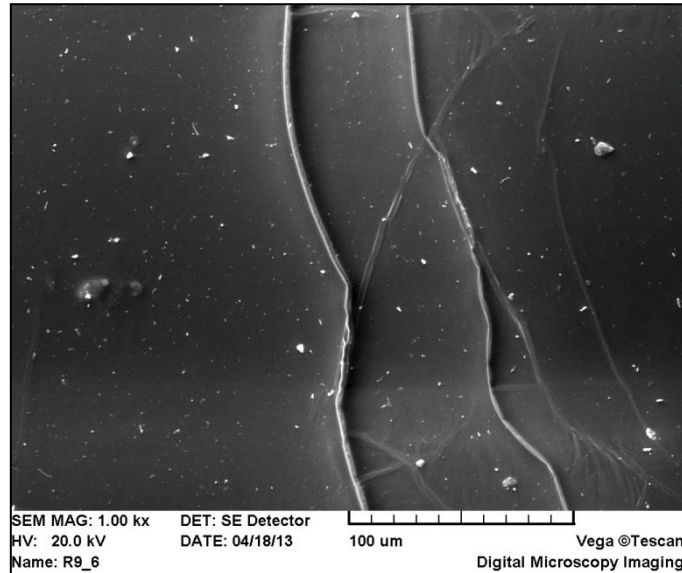
Modernizace hermetického uzávěru ochranné obálky reaktoru (HUGA)

V souvislosti s modernizací HUGA bylo třeba provést přesnou rozměrovou dokumentaci pryžového těsnění dveří. Pro tento účel byla využita manuálně mísitelná dvousložková silikonová hmota, určená pro použití na rozměrnějších objektech. Repliky byly odebrány ze série měřících míst tak, aby bylo možné na podkladě výsledků vytvořit detailní výkresovou dokumentaci těsnění.

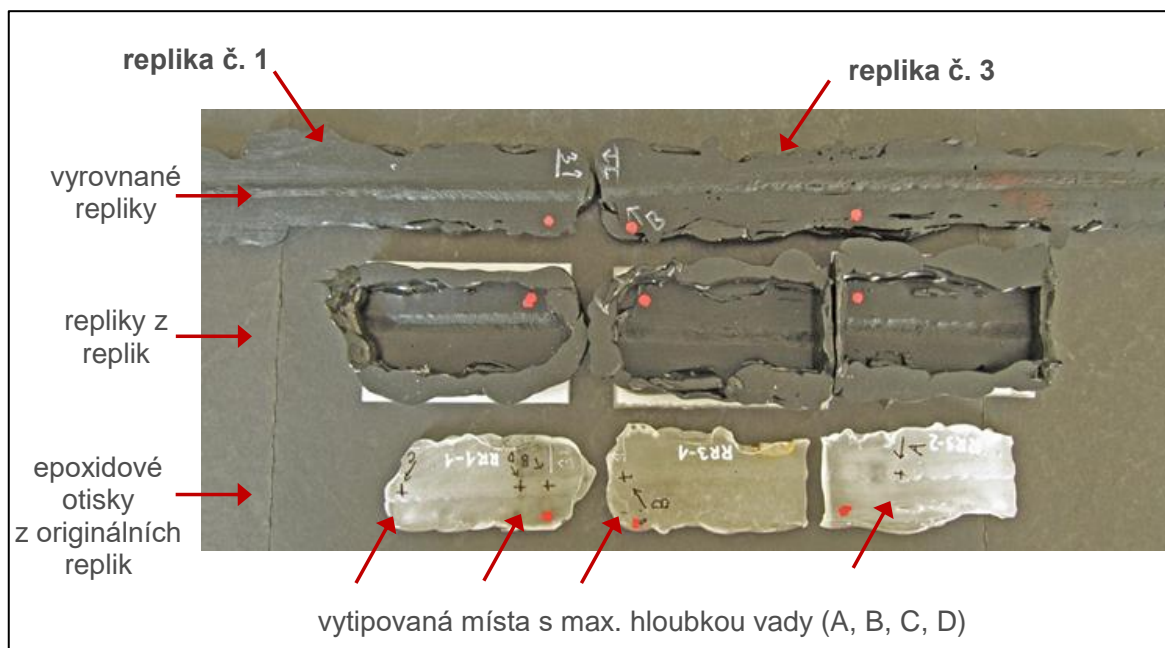
Závěr

Metoda silikonových replik při svém zavedení do praxe představila významné rozšíření možností nedestruktivního hodnocení komponent provozovaných energetických zařízení. Nezastupitelné využití má zejména při řešení úkolů, kde není nasazení ostatních metod nedestruktivního hodnocení prakticky realizovatelné. Metoda je nejčastěji využívána při

hodnocení degradace povrchu a kvality povrchové úpravy, detekce trhlin a pro metalografické aplikace. Důležitou výhodou metody replik je možnost přesunutí hodnocení vybraných charakteristik komponent do laboratorního prostředí s využitím přístrojů, jejichž výhod nelze čerpat při hodnocení v provozním prostředí.



Obr. 1. Detail otisku ústí trhlin na povrchu rozváděcího kola (zobrazeno v SEM).



Obr. 2. Fotodokumentace replik vytvořených pro hodnocení hubeného kořene svaru.

LTOS - PODPORA PRO ŘÍZENÍ ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ

LTOS - SW SUPPORT TO LIFE CONTROL OF EQUIPMENT

Pavel Cvešpr

I&C Energo a.s., Holandská 10, 639 00 Brno, tel: +420 606 718 987,
email: pcvespr@ic-energo.eu

Abstrakt

Informační systém LTOs je provozován v DV Výroba ČEZ, a.s. pro potřeby sledování životnosti zařízení a pro podporu přípravy dlouhodobého provozu zejména v oblasti energetiky jaderné. Účelem příspěvku je představit nové funkčnosti tohoto systému vyvinuté na základě zkušeností koncových uživatelů s jeho dlouholetým užíváním.

Information system LTOs currently running at DV Production CEZ, a.s. is used for requirements of Ageing management of equipment and for support of preparation for Long Term Operation in the area of nuclear energetics. Aim of the article is to reveal new functionalities in mentioned SW which were developed on base of experience of end users and by its long age operating.

Úvod

Informační systém LTOs [1] jako jeden z malého množství SW produktů řešících problematiku zjišťování technického stavu zařízení a jeho komponent na základě hodnocení výsledků diagnostik, revizí a zkoušek stanovených dle jednotlivých programů řízeného stárnutí je provozován v DV Výroba ČEZ, a.s. od roku 2011 a je dále rozvíjen na základě aktuálních požadavků koncových uživatelů s objektivní potřebou delšího výhledu do budoucnosti zejména z pohledu použitých informačních technologií.

LTO suite

Základním modulem tohoto systému je Registr zařízení, přes který probíhají veškeré informační toky mezi moduly sběru a hodnocení dat. Kromě standardně provozovaných modulů jako jsou Plánování, Dokumentace a Protokoly, Diagnostika, Integrovaně analytická vrstva a Prezentační vrstva byla v poslední době funkčnost LTOs rozšířena o Programy Řízeného Stárnutí a Databáze kvalifikací zařízení v souvislosti s prodloužením provozu JE Dukovany. Pro potřeby uhelných elektráren byl zprovozněn modul Materiálová databanka. Řízení přístupu uživatelů k jednotlivým částem systému zajišťuje modul Správa oprávnění.

Registr zařízení

Modul Registr zařízení eviduje popisné údaje zařízení a měřidel včetně jejich technických parametrů. Z důvodu řízeného přístupu uživatelů k informacím uloženým v LTOs je registr členěn do kategorií strojní, stavební, elektro, měření a regulace.

V současné době je v LTOs evidováno celkem 103300 zařízení včetně komponent z toho pro jaderné elektrárny 30 000 položek.

Uživatelům LTOs registrovaným v počtu 740 je možno přiřadit až 210 různých oprávnění s přihlédnutím k jednotlivým elektrárnám. Základní oprávnění je v členění čtenář, editace a export vybraných záznamů.

Modul EQDB

Modul Kvalifikace zařízení (EQDB) umožňuje zakládat a udržovat informace, které jsou vyžadovány SÚJB. K těmto patří zejména Bezpečnostní třída zařízení, Bezpečnostní systém, Odolnost na seismicitu a další informace vyžadované předepsanou kvalifikační dokumentací. Dosud je v systému LTOs evidováno celkem 20200 položek, které tyto požadavky splňují

a mohou být jako zařízení kvalifikované pro jaderné elektrárny na jejich technologické pozici instalovány.

Modul Řízení stárnutí

Ukládá informace předepsané v jednotlivých PŘS (Programy Řízeného Stárnutí), kde je stanoveno, v jakém rozpadu na komponenty se má zařízení sledovat, výčet působících degradačních mechanismů, indikace dosažení/překročení limitních hodnot, trendy růstu naměřených hodnot atd. Jedná se zejména o tato zařízení I.O.:

- Tlakové nádoby reaktoru
- Hlavní cirkulační čerpadla
- Hlavní uzavírací armatury
- Kompenzátory objemu
- Parogenerátory
- Vysokoenergetická potrubí

Uložené informace jsou vstupními údaji pro zjištění technického stavu sledovaného zařízení a stanovení jeho vývoje stárnutí do budoucnosti formou reportu hodnocení zařízení, zpracované v modulu integračně – analytická vrstva. Tato vrstva provádí integraci vstupů automaticky dle nastavitelných konfigurací a expertovi poskytuje dostatek podkladů k provedení analýzy výsledků z jednotlivých programů řízeného stárnutí a k vystavení zprávy z hodnocení životnosti sledovaného zařízení.

Periodické hodnocení životnosti za rok: 2016	
Skupina RE EDU	
Č. dokumentu v CTA a AS6: JCHO/TKEP/PHŽ/RE/EDU/2016	
TST_PŘŽ dle ECM:	ČEZ_TST_0033 PŘŽ reaktor
Elektrárna:	Elektrárna Dukovany
Blok / kampaň (ukončení předpoklad; požadavek):	3RB / 28 (2016; 2026) 1RB / 30 (2015; 2025) 2RB / 29 (2016; 2026) 4RB / 28 (2017; 2027)
Zařízení:	1YC00B01; 2YC00B01; 3YC00B01; 4YC00B01
Výčet parametrů s překročenými mezními hodnotami	
Na skupině zařízení byly za hodnocené období indikovány parametry s překročenou mezní hodnotou (dotčené konkrétní pozice jsou zřejmé z podrobného hodnocení, viz příloha):	
TSTPŘŽP0213	Stupeň rizika svarového spoje IZ - PŘS RMSS (zprávy ÚAM: ZP5728 a ZP5777)
TSTPŘŽP0004	Technické stárnutí IZ - Zpráva ÚJV DIITI 2301_247 - KS 2.3.2.10, protokoly z PPK
TSTPŘŽP0003	Koncepční stárnutí IZ - Zpráva ÚJV DIITI 2301_247 - KS 2.3.2.10
TSTPŘŽP0007	Korozní praskání pod napětím IZ - PPK, protokol J 01.15.E.0039
TSTPŘŽP0007	Korozní praskání pod napětím IZ - Protokol z PPK č. J 01.15.V.3101 (vytržené závity v odtlačovací přírubě nátrubku TK/MNT č. 18)

Obr. 1 Část úvodní strany reportu hodnocení skupiny reaktorů EDU

Standardní náplň reportu obsahuje tyto části:

- celkové hodnocení skupiny zařízení
- nápravná opatření pro další provoz
- přílohu se seznamem všech sledovaných parametrů a jejich hodnocení

Modul Materiálová databanka

Nový modul Materiálová databanka, který je integrován do prostředí LTOs, umožňuje ukládat do databázového prostředí LTOs hodnoty zjištěné při materiálových zkouškách za použití těchto metod:

- Chemické složení
- Zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Creepová zkouška
- Creep s měřenou deformací
- Únavová zkouška
- Měření tvrdosti
- Metalografie
- Ultrazvuk
- Gravimetrie
- Měření tvrdosti přenosnými tvrdoměry
- Redukované napětí
- Únavová zkouška – mez únavy/rychlost trhlin
- Lomová houževnatost statická/dynamická
- Měření ovality
- Měření tloušťky

Materiálová databanka se skládá z registru materiálu a registru zkoušek. Do registru materiálu se zadávají/editují kategorie materiálu, ve kterých je možno evidovat materiály dle jejich označení, mechanických vlastností a příkladů užití.

Označení materiálu	Označení normy	Tepel. zprac. - stav	Max. tlak [MPa]	Max. teplota [°C]	Příklady užití
11 373	ČSN 41 1373	.1	4	200	Dna a pláště parních kotlů, kondenzátorů parních turbin, dna komor, trubi...

Mechanické vlastnosti									
Mez kluzu Re [MPa]		Mez pevnosti Rm [MPa]		Tažnost A5 [%]		Houževnatost KCU3 [J.cm]		Tvrdost HB	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1		2		3		4		5	

Chemické složení [%]	
C	
11	

Obr. 2 Zadávání/editace potřebných údajů pro daný materiál

Na takto zadaný materiál navazuje agenda Registr zkoušek, která umožňuje pro daný materiál (vzorek) evidovat jednotlivé zkoušky. Ke každé zkoušce lze v LTOs evidovat jedním importem hodnoty všech metod v jejich výše uvedeném výčtu.

Forma importu je závislá na zdroji dat. Historická data je možno nahrát jednorázovým importem. Aktuální data výsledků z laboratorních zkoušek se průběžně importují vyplněnou šablonou v xls formátu včetně možnosti připojení protokolu/zprávy v digitální formě.

Výsledky zkoušek, které lze provádět jen na provozovaném zařízení, se zaznamenávají do diagnostických protokolů v doc formátu. Protokol je připojen k zařízení v registru zařízení LTO a jeho obsah se uloží do materiálové databanky.

ID	TMID	Materiál	Elektrárna	Název zařízení	Název zkušebny	Identifikační údaje zkušebny/laboratoře	Pracovní označení vzorku	Datum vystavení protokolu	Číslo protokolu	Autor protokolu (zprávy)	Místo p
49		15 128.5					M484				
48		15 128.5					M388				
47		15 128.5					M3575				
46		15 128.5					M3571				
45		15 128.5					M3190				
44		15 128.5					M2905				
43		15 128.5					M272				
42		15 128.5					L5084				
41		15 128.5					K13				
40		15 128.5					EX75305.9				
39		15 128.5					EX7305.5				

NAZEV	Název	Norma	Poznámka	Použitý přístroj	Typ zkoušky	Místo odběru vzorku	Způsob hodnocení	Teplota T [°C]	Průměr vzorku [mm]	Délka vzorku [mm]	Napětí sigma [MPa]	Čas t [h]	Celková deformace delta [mm]
Creepová zkouška	M272							525			176,58	1362	
	M272							525			196,2	467	
	M272							525			215,82	144	
	M272							525					

Obr. 3 Ukázka importu historických údajů pro daný vzorek

ID	TMID	Materiál	Elektrárna	Název zařízení	Název zkušebny	Datum vyst	Číslo protokolu	Místo prove	Datum provedení	Provozní hodiny	Prov. h. k datu
959	1053418	15 128.5	Elektrárna	12HAJ41BN0010000_1004246_potrubí spojovací MPI- MPI		17.8.2017	EDE/DTCK/02555/17/NDT	Na místě	17.8.2017	25008	17.8.2017
955	1053418	15 128.5	Elektrárna	12HAJ41BN0010000_1004246_potrubí spojovací MPI- MPI IC Energo		15.8.2017	EDE/DTCK/02553/17/NDT	Na místě	15.8.2017	25000	15.8.2017

NAZEV	Název	Norma	Vyhovuje	Číslo originálního protokolu	Poznámka	Použitý přístroj	Typ zkoušky
Měření tloušťky stěny	Vizuální kontrola vnějšího povrchu (VT)		Ano	VT-123	Text poznámky pro VT		Ostatní
	Vizuální kontrola vnitřního povrchu endoskopem - hrany vývrtů		Ne	End - 456	Text poznámky pro endoskop		Ostatní
	Ultrazvuková kontrola svarů (UT)		Ano	UT - 5877	Text poznámky pro UT		Ostatní
	Magnetická kontrola svarů (MT)		Ano	MT - 9554	Text poznámky pro MT		Ostatní
	Penetrační kontrola svarů (PT)		Ne	PT - 2652	Text poznámky pro PT		Ostatní
	Magnetická kontrola ZM (MT)		Ano	ZM - 5668	Text poznámky pro ZM (MT)		Ostatní
	Penetrační kontrola ZM (PT)		Ne	ZM(PT) - 575	Text poznámky pro ZM (PT)		Ostatní
	Kontrola trubek vířivými proudy na výskyt MKK (ET)		Ano	MKK (ET)	Text poznámky pro MKK (ET)		Ostatní
	RTG kontrola ZM trubek - důlková koroze, korozní praskání (RT)		Ne	RT	Text poznámky pro (RT)		Ostatní

Obr. 4 Příklad importu dat z diagnostiky prováděné na provozovaném zařízení

Závěr

Organizované uložení všech dat prostřednictvím LTOs 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 (51482 Projekt LTO, 2.) realizace SW řešení LTO*. Dodavatel OT Energy Services a.s. (I&C Energo a.s.), 2014.

POSUN PŘECHODOVÉ TEPLoty VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI OCELI P92 BĚHEM TEPLOTNÍ EXPOZICE

SHIFT OF IMPACT TRANSITION TEMPERATURE OF P92 STEEL DURING ISOTHERMAL AGEING

Marie Svobodová, Michal Junek, Josef Čmakal a Jindřich Douša

UJP PRAHA a.s.

Abstrakt

Martenzitická ocel P92, určená pro pracovní teploty okolo 600 °C, mění po prvních hodinách teplotní expozice svoji vrubovou houževnatost. Tato změna se projevuje především posunem přechodové teploty ze záporných ke kladným hodnotám. Příspěvek shrnuje výsledky zkoušek rázem v ohybu provedených na oceli P92 po teplotní expozici při teplotě 650 °C po dobu až 5 000 h. Tyto výsledky jsou dále doplněny o další mechanické (pevnost v tahu, tvrdost) a strukturní vlastnosti.

Martensitic steel of grade P92 designed for working temperatures around 600 °C changes its impact toughness after the first hours of thermal ageing. This change is manifested mainly by shifting the impact transition temperature from below to above 0 °C. This paper summarizes the results of the impact tests carried out on P92 steel after thermal exposure at 650 °C for up to 5,000 hours. These results are further complemented by additional mechanical (tensile strength, hardness) and microstructure properties.

Úvod

Žáropevná martenzitická ocel P92, legovaná 9 hm.% Cr, 0,5 hm.% Mo, 0,2 hm.% V, 0,05 hm.% Nb, 0,05 hm.% N, 0,004 hm.% B a 1,75 hm.% W, je určená především pro parovody pracující při teplotách okolo 600 °C a při tlacích okolo 20 MPa. Její zvýšené žárovevnosti je dosahováno kombinací precipitačního a substitučního zpevnění vyvolaného tepelným zpracováním: normalizací při teplotě okolo 1 050 °C a popuštěním při teplotách (750 – 780) °C. V průběhu provozní expozice však klesá role precipitačního zpevnění díky hrubnutí karbidických precipitátů především na hranicích zrn a zároveň dochází k ochuzování tuhého roztoku o substituční legury, především W, které vytvářejí křehkou intermetalickou Lavesovu fázi [1]. Precipitace této fáze je pak doprovázena makroskopickou změnou mechanických vlastností, především vrubové houževnatosti.

Tato práce byla zaměřena na popis změn mechanických vlastností, především vrubové houževnatosti a přechodové teploty oceli P92 v prvních hodinách isotermické laboratorní expozice. Jako experimentální materiál byl vybrán výřez rovné části ohybu parovodní trubky z oceli P92 o rozměrech OD 350 x 39 mm od španělského výrobce Productos Tubulares, s.a.u. (tavba 60074, chemické složení a výchozí mechanické vlastnosti uvádí Tab. 1). Tato část trubky byla dodána po dvojitým výchozím tepelném zpracování, nejdříve u výrobce trubky: 1 050 °C/60 min + 780 °C/140 min., poté u výrobce ohybu (MODŘANY Power, a.s.): 1 050 °C/60 min + 775 °C/140 min. Dodaný výřez oceli P92 byl rozřezán na 5 dílů (výchozí stav označen jako AR2) a čtyři díly byly následně isotermicky žíhány v elektrické odporové peci při teplotě 650 °C po dobu 500 h, 1 000 h, 2 000 h a 5 000 h. Poté byly ze všech 5 dílů vyrobeny metalografické výbrusy pro kontrolu mikrostruktury a měření tvrdosti a zkušební tělesa pro zkoušky rázem v ohybu a tahem při pokojové teplotě.

Zkouška rázem v ohybu

Z výchozího a degradovaných stavů oceli P92 byly vyrobeny podélně orientované standardní zkušební tyče dle ČSN ISO 148-1 s V vrubem, které pak byly přeraženy v souladu s normami ČSN ISO 148-1, ČSN 42 0350 a ČSN 42 0383 Charpyho kladivem 300 J při

teplotách od $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naměřené hodnoty nárazové práce, podílu houževnatého lomu a bočního rozšíření byly zpracovány do teplotních závislostí, viz Obr. 1, z nichž pak byly stanoveny přechodové teploty jako inflexní body těchto závislostí (u podílu houževnatého lomu byla navíc stanovena $FATT_{50}$). Z grafů a shrnující tabulky na Obr. 1 je patrný postupný posun přechodové teploty z výchozích cca $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ k cca $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, který se však po 1 000 h expozice zastaví. Delší doby expozice (2 000 h a 5000 h) se pak projevují již jen mírným, ale soustavným poklesem hodnoty vrubové houževnatosti, což lze doložit i na mírném poklesu nárazové práce při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ během teplotní expozice při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabulka na Obr. 1).

Zkouška tahem za pokojové teploty

Společně s tělesy pro zkoušku rázem v ohybu byla ze všech strukturních stavů odebrány podélně orientované krátké závitové tyče dle ČSN EN ISO 6892-1 o průměru dřívku 10 mm a se závitem M16 pro zkoušku tahem za pokojové teploty (s konstantní rychlostí 1 mm/min). Z naměřených hodnot meze pevnosti, meze kluzu (viz Obr. 2a a výchozí mechanické vlastnosti stavu AR2 v Tab. 1), tažnosti a kontrakce vyplynulo, že v průběhu teplotní expozice dochází nejdříve k poklesu meze pevnosti a meze kluzu o cca (30 až 40) MPa, po 2 000 h však zůstávají pevnostní charakteristiky nezměněné. Na hodnoty tažnosti a kontrakce nemá teplotní expozice výrazný vliv.

Rozbor mikrostruktury

Změny mechanických vlastností oceli P92 v průběhu teplotní expozice byly korelovány s mikrostrukturou, která byla pozorována na metalografických výbrusech v axiálním (podélném) a radiálním směru, a to pomocí světelné a elektronové mikroskopie, viz ukázka na Obr. 3. Mikrostruktura výchozího stavu AR2 je především v axiálním směru značně nehomogenní, vyskytují se zde oblasti s výrazně rozdílným stupněm popouštění martenzitické matrice (Obr. 3a) a kromě jemné karbidické disperze se zde nacházejí i karbidické řádky. Během teplotní expozice při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ se postupným popouštěním martenzitických látek tato nehomogenita vytrácí a mikrostruktura v obou směrech (axiálním i radiálním) se srovnává, karbidické řádky vzniklé při tváření trubky ovšem zůstávají (Obr. 3b). Na snímcích z elektronového mikroskopu (Obr. 3c,d) pak lze pozorovat změnu ve velikosti a počtu karbidických částic na hranicích martenzitických látek v prvních 1 000 h expozice, kdy jejich počet klesá a dochází k hrubnutí karbidů $M_{23}C_6$ za vzniku Lavesovy fáze [1], jemné částice typu $V(C,N)$ svoji velikost nemění (Obr. 3d). Delší doba expozice pak přináší kombinaci nové precipitaci karbidických částic a hrubnutí již vyloučených precipitátů.

Měření tvrdosti

Rozbor mikrostruktury doplňuje i měření tvrdosti HV10 dle ČSN EN ISO 6507-1 (Obr. 2b), které vyšším rozptylem naměřených hodnot ve výchozím stavu v axiálním a radiálním směru potvrzuje výchozí nehomogenitu mikrostruktury. Následný pokles tvrdosti po dobu 1 000 h pokračující opětovným mírným nárůstem pak odpovídá precipitačnímu ději a hrubnutí karbidických částic za současného popouštění martenzitické matrice.

Závěr

Vzájemnou korelací mechanických a mikrostrukturních vlastností oceli P92 během isothermické expozice při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ bylo zjištěno, že k výrazným změnám, jako jsou pokles meze pevnosti a meze kluzu, posun přechodové teploty směrem ke kladným hodnotám a prvotní pokles tvrdosti, dochází do 1 000 h, kdy se ve struktuře vylučuje Lavesova fáze na úkor již primárně vyloučených karbidů, čímž celkový počet karbidických částic klesá. Pak ale dochází k nové precipitaci (proces zpevňování) a hrubnutí již vyloučených precipitátů za současného popouštění martenzitických látek (proces odpevňování). Tyto děje během 1 000 h až 5 000 h expozice spolu vzájemně vyrovnaně soupeří, což se projevuje stagnací přechodové

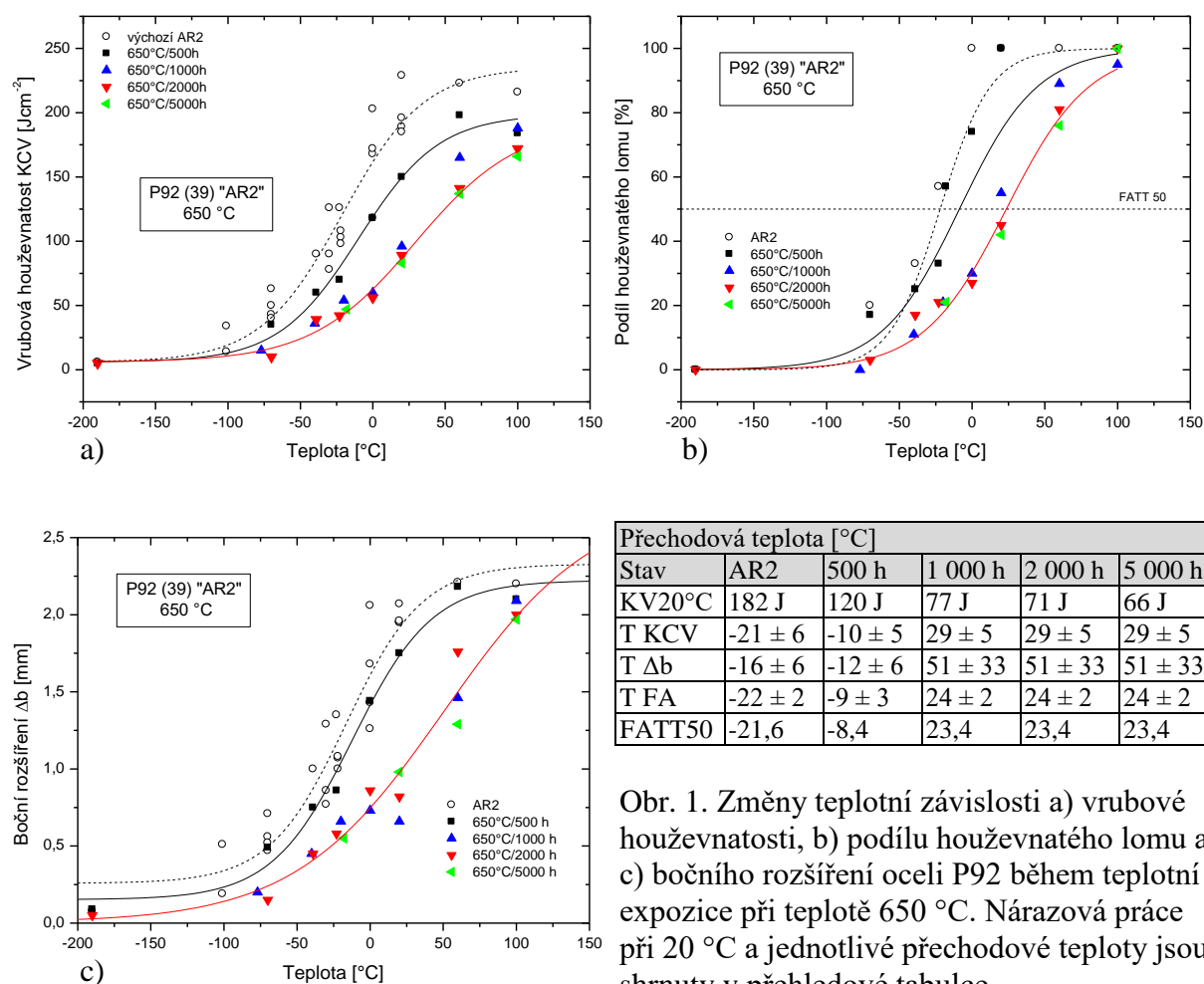
teploty, pevnostních charakteristik i tvrdosti, pouze vrubová houževnatost mírně klesá (což bude způsobeno popouštěním martenzitické struktury).

Literatura

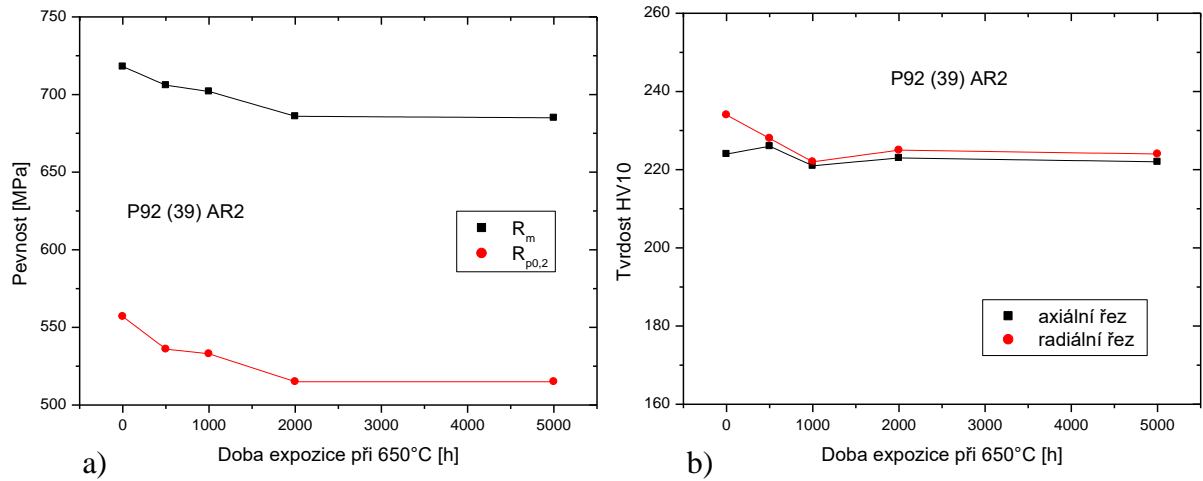
- [1] Zieliński, A., Golański, G., Sroka, M. (2016): *Assessment of microstructure stability and mechanical properties of X10CrWMoVNb9-2 (P92) steel after long-term thermal ageing for high-temperature applications*. *Kovove Mater.* 54 (2016) 61-70.

Tab. 1. Chemické složení oceli P92 a výchozí mechanické vlastnosti

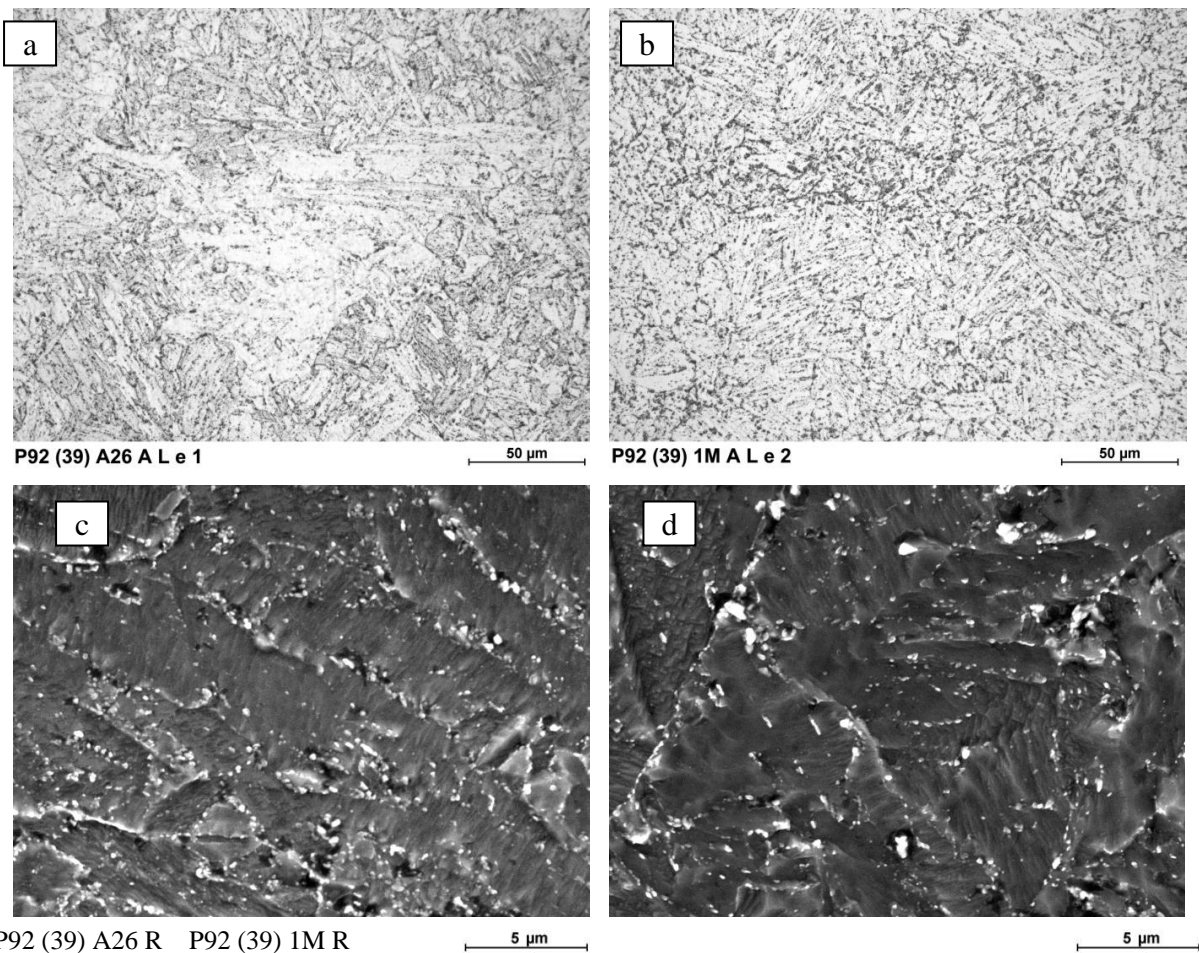
Chemické složení v hm. %												
Materiál	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N	W	ostatní
ASTM	0,08 0,13	max. 0,50	0,30 0,60	max. 0,020	max. 0,010	8,50 9,50	0,30 0,60	0,15 0,25	0,04 0,09	0,030 0,070	1,50 2,00	B 0,001 - 0,006; Al max. 0,040
60074	0,11	0,37	0,48	0,013	0,005	8,58	0,33	0,23	0,06	0,037	1,62	B 0,0015; Al 0,017
Mechanické vlastnosti												
Materiál	mez kluzu Rp0,2			mez pevnosti Rm			tažnost A			další		
ASTM	min. 440 MPa			min. 620 MPa			min. 20 %			-		
60074	555 MPa			737 MPa			23,7 %			tvrdost 218 HB (233 HV)		
AR2	558 MPa			724 MPa			23,0 %			229 HV10		



Obr. 1. Změny teplotní závislosti a) vrubové houževnatosti, b) podílu houževnatého lomu a c) bočního rozšíření oceli P92 během teplotní expozice při teplotě 650 °C. Nárazová práce při 20 °C a jednotlivé přechodové teploty jsou shrnuty v přehledové tabulce.



Obr. 2. Změny mechanických vlastností – a) mezí pevnosti a kluzu, b) tvrdosti – oceli P92 během teplotní expozice při teplotě 650 °C.



Obr. 3. Porovnání mikrostruktury oceli P92 a, c) ve výchozím stavu a b, d) po expozici 650 °C/1 000 h. Snímky byly pořízeny a, b) světelnou (axiální směr) a c, d) elektronovou (radiální směr) mikroskopií.

POSOUZENÍ KOROZNÍ ODOLNOSTI DÍLŮ PARNÍCH TURBÍN S VYUŽITÍM LOMOVÉ MECHANIKY

CORROSION RESISTANCE EVALUATION FOR STEAM TURBINES BY FRACTURE MECHANICS

Miroslav J. Černý

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

Abstrakt

Příspěvek se zabývá hodnocením únavové koroze dílů parních turbín z hlediska vzniku krátkých únavových trhlin.

Lomová mechanika a Kitagawa- Takahashi (K-T) diagram

Pro hodnocení vlivu důlkové koroze na únavové vlastnosti materiálů lze použít lineární lomovou mechaniku. Bylo zjištěno, že většina korozních důlků má přibližně semi-eliptický tvar s šířkou důlku na povrchu $2c$ a hloubkou a (obr. 1). Výsledky výzkumů ukazují, že tyto korozní důlky mohou být uvažovány jako semi-kruhové povrchové trhliny (hloubka je potom c). Protože se předpokládá, že únavové trhliny se tvoří na okraji korozního důlku, rozměr c (polovina šířky korozního důlku), rozměr a je použit pro popis korozního důlku. Dalším předpokladem je, že rozměr korozního důlku je malý vzhledem k velikosti trhliny. Potom může být stanoven faktor intenzity napětí ΔK [1].

$$\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot c}$$

kde

Y je geometrický součinitel ($Y=0,65$)

$\Delta \sigma$ je rozkmit napětí

c je poloviční šířka korozního důlku

Jednou z hlavních vlastností faktoru intenzity napětí by měla být geometrická invariantnost vzhledem k délce trhliny.

Experimentální výzkumy z posledních deset let ukázaly, že tato invariantnost faktoru intenzity napětí má omezenou platnost. Protože faktor intenzity napětí neumožňuje dostatečně přesný popis pole deformací, vznikající v okolí čela krátké trhliny při vysokých úrovních napětí, není pomocí něj možné jednoznačně popsat šíření těchto trhlin [2].

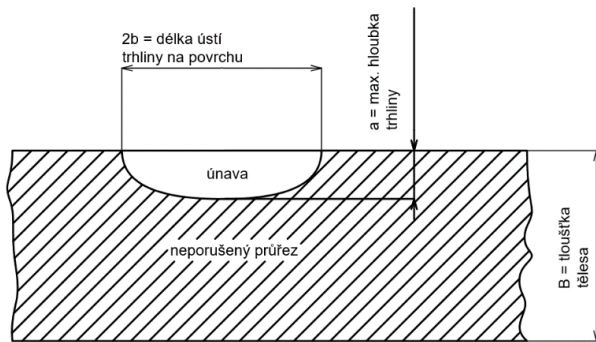
Krátká trhlina je pojem relativní, závislý na úrovni napětí a deformace. Porovnáním chování dlouhé trhliny při nízkém rozkmitu napětí a krátké trhliny (povrchové mikrotrhliny) bylo zjištěno, že při stejném faktoru intenzity napětí a krátké trhliny při vysokém rozkmitu napětí je rychlost šíření krátké trhliny podstatně větší, než rychlost šíření dlouhé trhliny. Rozdíl je tím větší, čím větší je v případě krátké trhliny rozkmit napětí.

Rychlost šíření krátké trhliny (povrchové mikrotrhliny) závisí nejen na úrovni napětí, ale i na mikrostruktuře materiálu. Čím je vyšší úroveň napětí v kritickém místě, tím je větší plastická deformace v povrchovém zrně materiálu a tím větší rychlostí se trhlina v tomto zrně šíří. Počáteční pokles rychlosti je způsoben interakcí čela únavové trhliny s první podpovrchovou hranicí zrn. Trhlina prochází hranicí zrn plynule do dalších podpovrchových zrn a postupně se chová jako dlouhá trhlina. Průběh ΔK je na obr. 2.

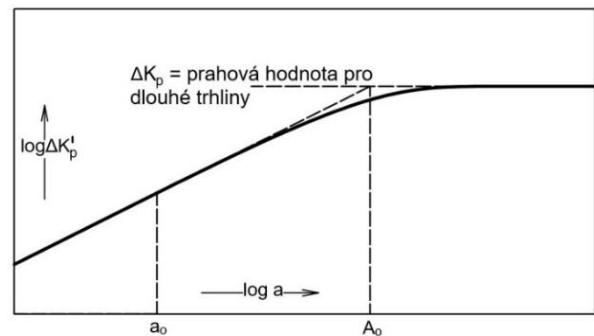
Závislost meze rozkmitu napětí (únavy) $\Delta \sigma_p$ (prahové hodnoty $\Delta \sigma$) na délce trhliny a lze vyjádřit pomocí Kitagawova – Takahashi diagramu. V oblasti a a menší než a_0 (strukturní

parametr, obr. 2) mez únavy na délce trhliny nezávisí. Podobně lze vyjádřit K-T diagram závislosti ΔK na délce trhliny a [3].

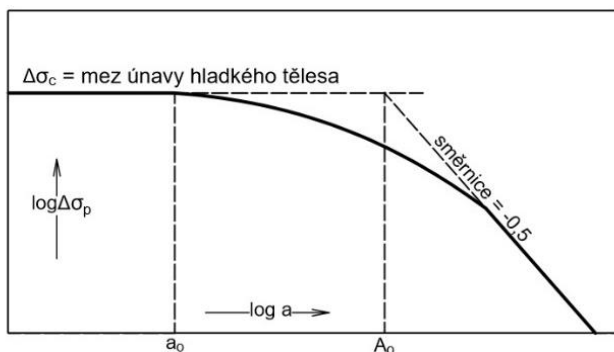
Uvedený diagram platí pro 403/410 12% Cr martenzitickou ocel. The K-T diagram koreluje rozměry korozního důlku s hodnotami únavy. Data jsou vztažena k hodnotě R (poměr minimálního a maximálního napětí pro kombinaci stálého a cyklického napětí). Ve výsledku K-T diagramy mohou být použity pro odhad meze únavy a životnosti korodovaných částí parních turbín (obr. 4) – např. pro korod. ocel s pol. šířkou korozního důlku $50 \mu\text{m}$ je $\Delta\sigma_p$ 280 MPa.



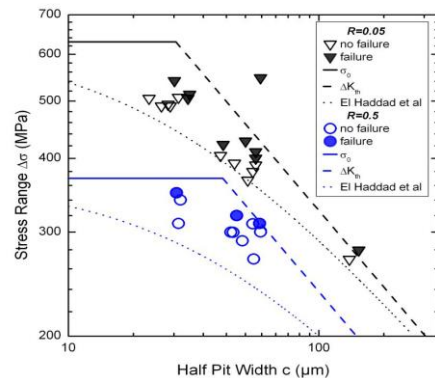
Obr. 1 Povrchová semieliptická trhlina



Obr. 3 K-T diagram závislosti ΔK – a



Obr. 2 K-T diagram závislosti $\Delta\sigma$ a



Obr. 4 K-T diagram pro 403/410 ocel

Příspěvek byl vytvořen v rámci grantového projektu TE01020068.

Literatura

- [1] Černý M.(2016): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*, Applied Mechanics and Materials, vol.827 (2016), Trans Tech Publications, doi:10.428/www.scientific.net/AMM.827.177.
- [2] Černý M.J.(2017): *Modeling of Corrosion Fatigue Damage in Steel Alloy for Steam Turbines*, Proc.EAN 2017, Nový Smokovec, Slovakia.
- [3] Salzman R., Gandy D., Rieger N., Schönbauer B., Tchegg S., Zhou S., Turnbull A. (2013): *Corrosion-fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades*, Energy-tech.

VLIV LABORATORNÍ TEPLOTNÍ EXPOZICE NA ZPŮSOB MECHANICKÉHO PORUŠOVÁNÍ AUSTENITICKÉ OCELE HR3C

THE CHANGES IN FRACTURE MECHANISM OF THE AUSTENITIC STEEL HR3C CAUSED BY ISOTHERMAL LABORATORY AGEING

Jakub Horváth^{a,b)}, Jiří Janovec^{b)} a Ladislav Horváth^{a)}

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

^{b)} ČVUT, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

Abstrakt

Příspěvek je zaměřen na popis změn ve vysoce legované progresivní austenitické oceli, celosvětově používané pro vysokoparametrickou (USC) energetiku, HR3C způsobené její teplotní expozicí. Hodnotí dopad laboratorní teplotní expozice na změnu mechanických vlastností. Dále je proveden rozbor lomových ploch za použití elektronové mikroskopie z pohledu změny mechanismu porušování.

This paper deals with isothermal ageing induced changes in microstructure and its influence into mechanical properties. Investigated material was high alloyed austenitic steel HR3C in general worldwide applied for the ultra-supercritical (USC) powerplants. Differences in the measured mechanical properties caused by an isothermal ageing are evaluated. The electron microscopy fracture surfaces analysis focused on presence of the brittle particles is listed.

Úvod

Je obecně známým faktem, že zvýšením pracovních parametrů páry se zvyšuje účinnost parního oběhu a tím i celého energetického celku a snižuje se emise škodlivin. Ekonomicko-technický rozbor této tematiky je uveden v [1], kde je případ popsán na USC kotli s instalovaným výkonem 750 MW.

Stručný rozbor přínosu zvýšení pracovních parametrů [1]:

- Pracovní parametry páry: teplota 750 °C a tlak 35 MPa
 - Efektivita energetického celku při daných nadkritických pracovních parametrech: 45 % (efektivita podkritického kotle 37 %)
 - Při použití dvoustupňového přehřátí páry je možné zvýšit účinnost až na 47 %
 - Z toho plynoucí roční úspora na uhlí 16,4 mil. \$ (nebo 330 mil. \$ za dvacetiletou dobu životnosti elektrárny)
- Snížení emise škodlivin z hodnoty 0,85 na hodnotu 0,67 tun/MWh
 - Tento pokles odpovídá 22 % a snížení a přibližně pokles o 700 000 tun CO₂ ročně
 - Což bude znamenat snížení nákladů na emisní povolenky

Doposud byla řeč pouze o pozitivěch a možných přínosech, nicméně s nárůstem pracovních parametrů narůstá i tepelné zatížení použitých materiálů. To vede ke vzniku nepříznivých změn v mikrostruktuře, které se projeví do změny mechanických vlastností. V [2] jsou uvedeny podmínky vzniku křehkých fází v korozivzdorných austenitických ocelích, kde ocel HR3C tyto podmínky splňuje, tím pádem vzniká vysoká šance, že bude docházet ke vzniku těchto křehkých fází, které budou zhoršovat vlastnosti ocele. Výsledky publikované v [3-5] potvrzují výskyt částic, které mohou být identifikovány jako křehká intermetalika. Těmito precipitačními změnami a jejich dopadem se zabývá tento článek.

Použitý experimentální materiál

Jako experimentální materiál byla použita vysoce legovaná žárovečná austenitická ocel HR3C, která byla vyvinuta pro aplikaci na teplosměnné plochy vysoko-parametrických uhelných elektráren. [6,7] Odolnost tečení je u této oceli zajištěna zvýšeným obsah základních legur chromu a niklu, dále pak legováním niobem a dusíkem. Přesné hodnoty chemického složení použité oceli byly (Hm. %): 0.06 C, 0.41 Si, 1.19 Mn, 0.016 P, <0.001 S, 24.9 Cr, 19.9 Ni, 0.44 Nb, 0.26 N, a bal. Fe.

Pro experimentální část byly použity vzorky ze základního materiálu a dále pak z materiálu žíhaného a nežíhaného, které byly následně podrobeny laboratornímu isothermickému žíhání při 675 °C po dobu 20 000 hodin.

Provedená zkoušení

Zkouška tahem. Pro zkoušení byly použity tahové tyče s průměrem 5 mm při konstantní rychlosti zatěžování 0,5 mm/s. Výsledky měření shrnuje tabulka 1. Použité označení je základní materiál – ZM, exponovaný materiál nežíhaný – Ex-N, exponovaný materiál žíhaný Ex-Z. Pro porovnání jsou v tabulce jedna uvedeny i normované hodnoty pro ocel HR3C. Obrázek 1 ukazuje následně hodnocenou vzniklou lomovou plochu na tahové tyči.

Zkouška rázem v ohybu. Pro měření absorbované energie byla použita redukovaná tělesa s tloušťkou 5 mm s 2 mm V vrubem. Shrnutí výsledků měření uvádí tabulka 2. Pro srovnání morfologií lomu jsou uvedeny obrázky 2 (základní materiál) a 3 (materiál po expozici 20 000 hodin).

Analýza fází na lomových plochách. Pro ověření přítomných fází na lomové ploše bylo použito energiově disperzní analýzy s následným porovnáním chemického složení fáze s [2]. Výsledek měření je patrný na obrázku 4. Chemické složení odpovídá nominálnímu složení sigma fáze. Pro lepší vzhled na dopad precipitace bylo provedeno orientační měření obsahu sigma fáze ve zkoušených vzorcích, kde byly stanoveny plošné podíly sigma fáze 1.9 % (Ex-N) a 2.2 % (Ex-Z). V základním materiálu nebyla sigma fáze přítomná.

Závěr

Na základě provedených měření je možné potvrdit postupné precipitační vytvrzování během teplotní expozice (Tab. 1). To samo o sobě není nijak problematické, bohužel spolu s nárůstem pevnosti se také snižuje tažnost. To naznačuje pokles elastických vlastností. V případě austenitických ocelí, které jsou obecně velmi tažné, a tvárné může být tento závěr zapříčiněn oslabením hranic zrn, které tak snižují svojí schopnost přenášet napětí. Pokud vezmeme v úvahu výsledky z tab. 1 a fotodokumentaci lomové plochy vzorku tahové tyče je patrný výskyt intergranulárního šíření lomu, jinak řečeno rozvoj trhliny jde po hranicích jednotlivých zrn. Pokles plastických vlastností bude mít při aplikaci tohoto materiálu nepříznivý vliv na únavové vlastnosti, nebude totiž docházet k otupení čela šířící se trhliny a tím k jejímu zpomalení.

Po provedení zkoušek rázem v ohybu byly porovnány lomové plochy (viz obr. 2 a 3). Je zde jasně patrný přechod od tvárného transkrystalického porušení ke křehkému interkrystalickému způsobu porušení. Vznikající částice na hranicích zrn, identifikované jako sigma fáze (Obr. 4), tedy silně degradují plastické vlastnosti což je hlavně patrné na změně nutné absorbované energie k porušení tělesa. Pro základní materiál byla změřena střední hodnota 164,5 J na rozdíl od exponovaného materiálu 3,2 J (N) a 2,7 J (Z).

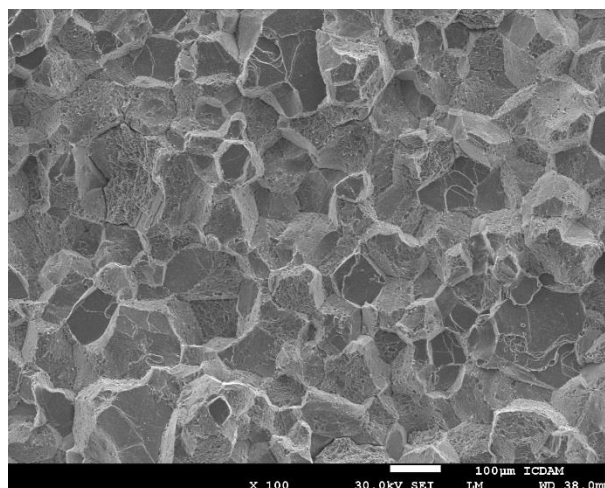
Celková změna mechanických vlastností bude způsobovat jak provozní problémy tak i praktické zhoršení provedení kvalitní opravy svařováním těchto materiálů, neboť vznik napětových polí při svařování bude moci iniciovat rozvoj porušení.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl na základě výsledků získaných za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu č. TA01010181, Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu č. FR-TI3/458, Ministerstva školství tělovýchovy a sportu České republiky v rámci projektu č. LO1207, a dále podpory grantové agentury Českého vysokého učení technického v Praze v rámci projektu č. SGS 16/215/OHK2/3T/12.

Literatura

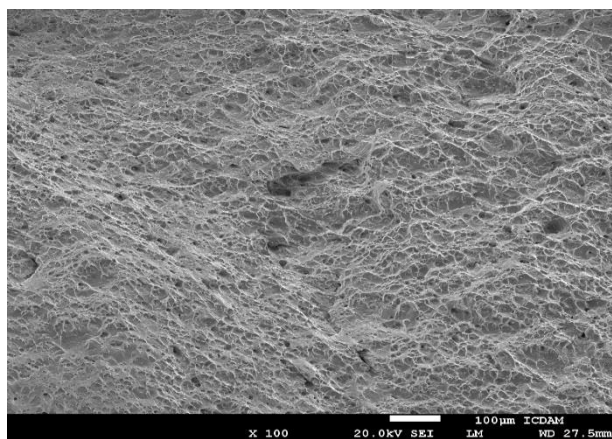
- [1] Viswanathan, R., Henrey, J.F., Tonzosh, J., Stanko, G., Shingledecker, J., Vitalis, B., Purgert, R. (2005): *U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plant*, Journal of Materials Engineering and Performance
- [2] Hsieh, C.C., Weite, W. (2012): *Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels*, ISRN Metallurgy
- [3] Horváth, J. (2014): *The Influence of Large Plastic Deformations to Properties of Creep Resistant steels HR3C and SUPER 304 H*, Prague: Czech Technical University in Prague
- [4] Horváth, L., Andršová, I., Podhorná B., Horváth, J. (2014): *Programme TIP of Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic, project "Materials for Industrial Plants operating with Ultra-Superheated Steam"*, Prague
- [5] Horváth, L., Andršová, I., Horváth, J. (2014): *Programme ALFA of the Technology Agency of the Czech Republic, project "Bending of Tubes for Superheaters and Reheaters exchanging Surfaces in new Boilers (IV)"*, Prague
- [6] Nippon steel a Sumitomo metal (2015): *Seamless steel tubes and pipes for boilers*, Japan
- [7] Viswanathan, R., Sarver, J., Tanzosh, J.M. (2005): *Boiler Materials for Ultra-Supercritical Coal Power Plants - Steamside Oxidation*, Journal of materials engineering and performance, ASM international
- [8] VdTÜV-Werkstoffblatt 546 (2008): *Creep Resisting Rolled and Forged Steel X6CrNiNbN25-20 (1.4952)*, Germany: VdTÜV



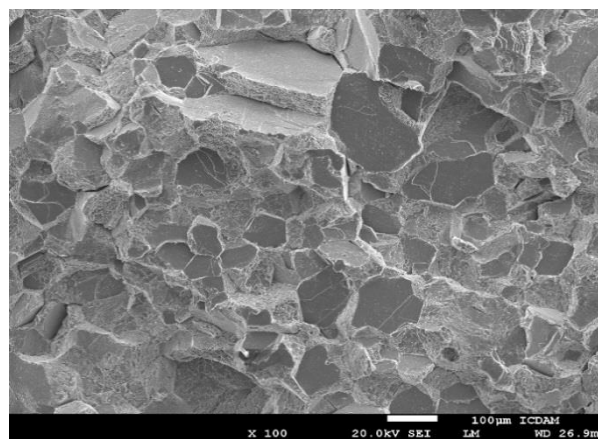
Obr. 1 Lomová plocha pořízená na tělese z tahové zkoušky

Tab. 1 Výsledky tahových zkoušek ocele HR3C

Materiál	HR3C		
Stav	Rp 0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
Standard	min. 295 [8]	655-900 [8]	min. 30.0 [8]
ZM	369	769	55.9
Ex-N	504	813	18.9
Ex-Z	439	839	14.3



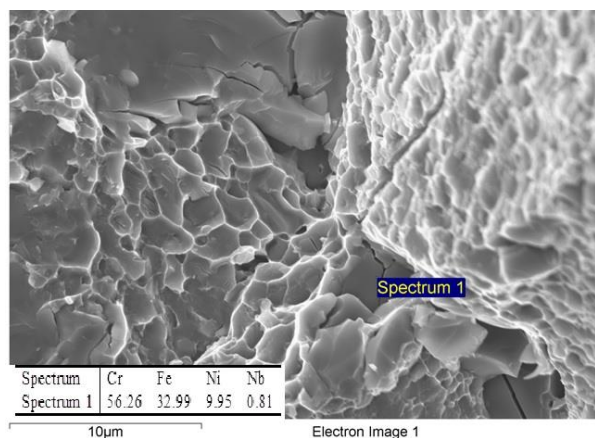
Obr. 2 Lomová plocha základního materiálu



Obr. 3 Lomová plocha exponovaného materiálu

Tab. 2 Výsledky zkoušek rázem v ohybu ocele HR3C

Materiál	HR3C	
Stav	KV 300/5 [J]	Plošný podíl sigma fáze [%]
ZM	164.5 ± 3.2	0.0
Ex-N	3.2 ± 0.1	1.9
Ex-Z	2.7 ± 0.2	2.2



Obr. 4 Detail lomové plochy s výsledky chemické analýzy křehké částice na povrchu

MECHANICKÉ VLASTNOSTI MARTENZITICKÉ OCELE CB2

MECHANICAL PROPERTIES OF MARTENZITIC STEEL CB2

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

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

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

Abstrakt

Martenzitická ocel CB2 (GX13CrMoCoVNbNB-1011) je výsledkem dlouhodobého výzkumu, který proběhl v rámci mezinárodní evropské spolupráce programu COST 536. Vlastnosti materiálu CB2 jsou v dostupné literatuře popsány jen velmi málo. Studium mechanických vlastností, včetně dlouhodobějšího creepového chování, ocele CB2 bylo provedeno ve spolupráci SVÚM, a.s. a ŽĐAS, a.s. V předloženém příspěvku jsou shrnuty výsledky tohoto experimentálního výzkumu.

Martensitic steel CB2 (GX13CrMoCoVNbNB-1011) is the result of research conducted in international European cooperation COST. Little information on the CB2 material properties is in the literature. The study of mechanical properties, including long-term creep behaviour of steel CB2 was carried out in cooperation with SVÚM, a.s. and ŽĐAS, a.s. The presented paper summarizes the results of this experimental research.

Úvod

Martenzitické 9-12%Cr ocele jsou používány pro výrobu částí parních turbín, které jsou vystaveny nejvyšším teplotám. Jsou to materiály s vysokou žárupevností, vynikající korozní odolností, vysokou tepelnou vodivostí, nízkou teplotní roztažností a relativně mírnou cenou. Tyto vlastnosti předurčují použití v oblasti maximálních teplot a tlaků páry.

Počátky aplikace 9%Cr martenzitických ocelí při konstrukci moderních energetických zařízení souvisí s devadesátými léty minulého století. Nejprve to byla ocel P91 (9%Cr-1%Mo), vyvinutá v Americe. Další užívané ocele jsou japonské P92 (9%Cr-2%W), která se do vývoje dostala skoro o 10 let později. Tyto dva materiály jsou nejčastěji citovány [1].

Ocel CB2 se vyvinula v Evropě v rámci programu COST 522 a COST 536. Je to materiál 9%Cr s kontrolovaným obsahem B a N. Tato ocel byla navržena pro výrobu litých nebo tvářených částí turbín, jejichž dlouhodobá teplota použití je až 620°C. V rámci příspěvku bude pozornost zaměřena na žárupevnost této oceli v lité verzi. Tento materiál je označován značkou GX13CrMoCoVNbNB-1011.

Chemické složení oceli CB2

Vývoj ocelí v programu COST je popsán v práci [2]. Na základě dlouhodobých creepových zkoušek různých variant byla vybrána ocel CB2 jako nejlepší a dále studována. V dostupné literatuře se však další creepové výsledky již neobjevují. Výjimku tvoří práce plzeňského pracoviště, kde byl metalograficky zkoumán litý materiál CB2 před a po dlouhodobé expozici při creepových zkouškách při teplotě 650 °C [3], [4].

Chemické složení ocele CB2 podle [5] je uvedeno v Tab. 1. Tato ocel je legována kromě 9,5%Cr a 0,13%C také 1%Co, 1,5%Mo, 0,2%V, 0,06%Nb a dále menšími přísadami B a N. Chemické složení se projeví na struktuře materiálu. Mikrostruktura je tvořena temperovaným martenzitem, kde jsou primární nitridy B a Nb, sekundární částice M₂₃C₆, VN a Lavesovy fáze. Během vysokoteplotní expozice se vytvářejí jistě MX nitridy a je možno pozorovat též Z fázi [3], [4].

Lze tedy konstatovat, že vývoj ocele CB2 byl orientován těmito kroky:

- a) Za účelem zvýšení žárupevnosti byl redukován obsah Ni
- b) Stabilitu struktury a creepová pevnost byla zvýšena obsahem B a N
- c) Nižší obsah Ni byl nahrazen zvýšeným Co
- d) Obsah Mo byl zvýšen a W odstraněn za účelem zvýšení stability
- e) Dříve zkoumaný vliv C, V a Nb byl optimalizován

Ocel CB2 je nyní již komerčně používána pro výrobu litých částí moderních parních turbín, které jsou vystaveny teplotám do 620 °C [6].

Krátkodobé mechanické vlastnosti

Výsledky tahových zkoušek při pokojové teplotě pro různé technologické varianty jsou uvedeny na Obr. 5, kde je zřejmé, že až na výjimky vyhovují hodnotám požadovaných dle [5]. Na Obr. 6 jsou uvedeny hodnoty tahových zkoušek při teplotě 550 °C.

Žárupevnost lité ocele CB2

Jak již bylo konstatováno, informace o výsledcích creepových zkoušek ocele CB2 nejsou v dostupné literatuře k dispozici. Proto bylo v ŽĎAS, a.s. odlito větší množství vzorků pro zkoušky žárupevnosti. Zkoušky pak byly vykonány ve SVÚM a.s., část výsledků bylo již publikováno na předchozí konferenci [7]. Dnes uvádíme nové výsledky creepových zkoušek. Do tohoto souboru byly zahrnuty také výsledky creepových zkoušek při teplotě 650 °C na zahraničním odlitku ventilu (místa A a B), které byly provedeny v Plzni [3], [4]. Celková doba nyní hodnocených zkoušek je 72 000 h.

Na Obr. 7 jsou zobrazeny všechny výsledky creepových testů, provedené na lité oceli CB2 v SVÚM a.s. a v Plzni. Je zřejmé, že se všechny výsledky pohybují ve vyhraničených mezích $\pm 10\%$.

Pro vyhodnocení všech zkoušek žárupevnosti byl použit Seifertův model [8] s Larson-Millerovým parametrem PLM ve tvaru

$$\log \sigma = A_1 + A_2 P_{LM} + A_3 P_{LM}^2, \quad (1)$$

kde $P_{LM} = T \cdot (\log(t_r) + A_4)$, σ je napětí [MPa], T je teplota [K], t_r je doba do lomu [h], $A_1 - A_4$ jsou materiálové konstanty, pro ocel CB2 byly vyhodnoceny následující hodnoty.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
A1	3,2166	A3	-1,9019E-09
A2	3,2655E-5	A4	35

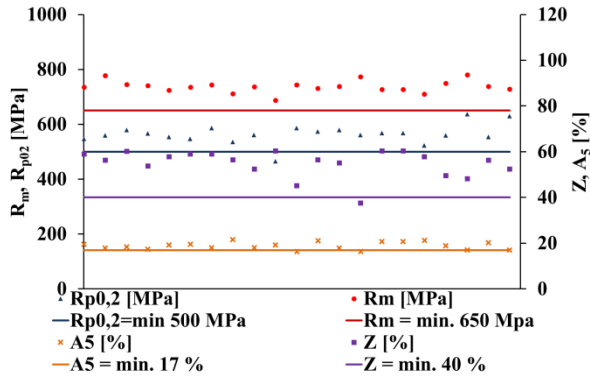
Závěr

V předloženém příspěvku jsou shrnuty výsledky vlastních krátkodobých mechanických zkoušek a creepových vlastností materiálu CB2 vyrobeného v ČR.

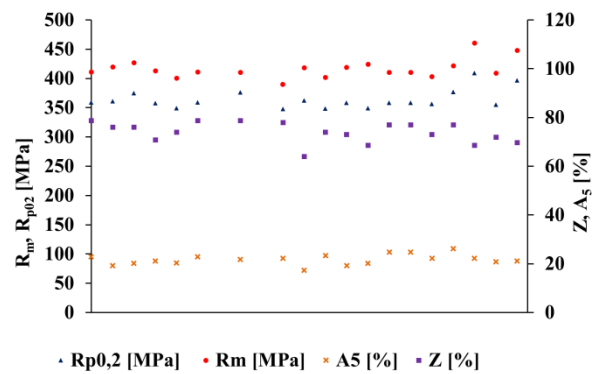
Výsledky creepových zkoušek byly zpracovány Seifertovým modelem. Grafická interpretace závislosti doba do lomu-napětí, teplota. Tato závislost je pro teploty 550 až 650 °C uvedena na Obr. 8. Creepové vlastnosti ocele CB2 převyšují při dlouhodobých zkouškách ocele P91 a P92, což je uvedeno v [7].

Tab. 1. Chemické složení lité oceli CB2 [hm.%]

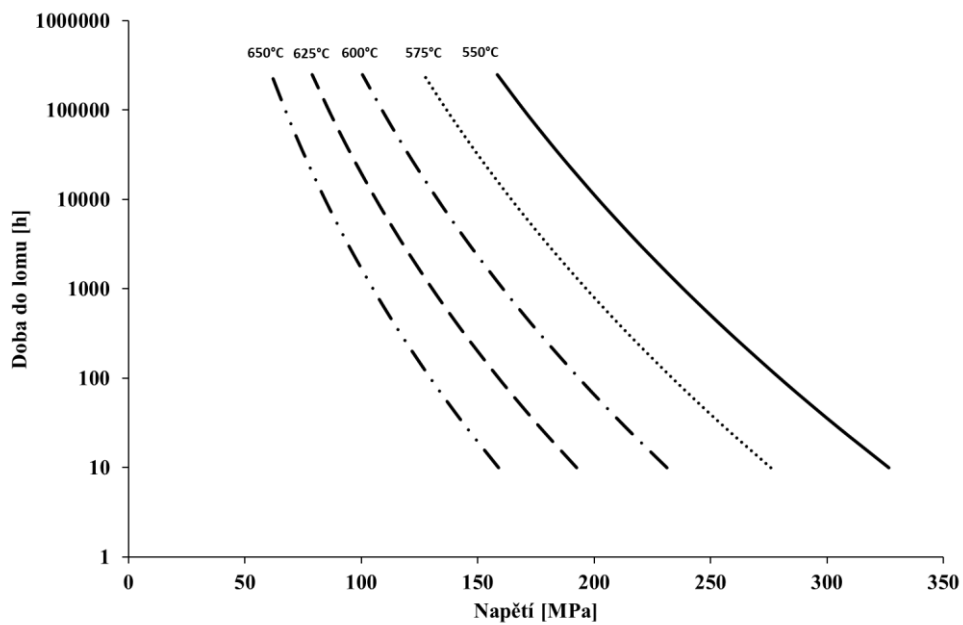
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	W	V	Nb	Al	B	N	Ti
min.	0,120	0,2	0,8			0,1	9,0	0,9	1,40		0,18	0,05	0,010	0,008	0,015	
max.	0,140	0,3	1,0	0,010	0,005	0,2	10,0	1,1	1,60		0,22	0,07	0,020	0,015	0,030	0,005



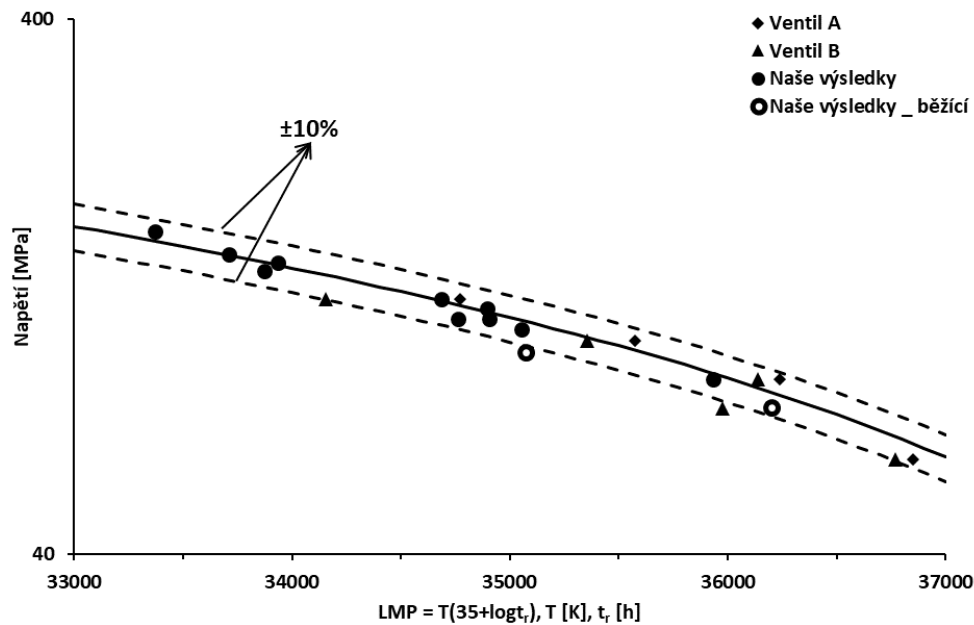
Obr. 5 Mechanické vlastnosti, 20°C



Obr. 6 Mechanické vlastnosti, 550°C



Obr. 7. Žárupevnost lité verze oceli CB2



Obr. 8. Závislost doby do lomu na napětí a teplotě lité ocele CB2

Literatura

- [1] KIMURA, K.-TABUCHI, M.-TAKAHASHI, Y.-YOSHIDA, K.-YAGI, K.: *Long-term creep strength reduction factor for weld joints of ASME grades 91,92 and 122 types steels*. Int. Jour. Microstructure and Material Properties. Vol.6., Nos.1,2011, p.72.
- [2] STAUBLI, M. – HANUS, R. – WEBER, T. – MAYER, K-H. – KERN, T-U.: *The European efforts in development of new high temperature casing materials – COST 536; Materials for Advanced Power Engineering; Jülich; 2006, vol.53, Part II, p. 855-870.*
- [3] KASL, J., JANDOVÁ, D.: *Metallography of CB2 Steel Used for Cast Turbine Components; Materials Science Forum, Vol.782,2014, p.179*
- [4] JANDOVÁ, D., KASL, J.- CHVOSTOVÁ, E.: *Metallography of CB2 Steel Used for Cast Turbine Components; Materials Science Forum, Vol.782, 2014, p.311*
- [5] *CB2-Pilot Castings. Investigations Stepped Block*. Foundry Linz, Voestalpine,2006.
- [6] ROBERTS, S.; *Martensitic steels for cast components in ultra-supercritical power plants; Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants; Elsevier; 2017; p.121-141*
- [7] VLASÁK T., ČECH J., NEUMANNOVÁ Š, HAKL J. HAVELKOVÁ, L., SOCHOR, J.: *Vliv svařování na creepové vlastnosti martenzitických ocelí; konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách Srní, 18.-20. říjen 2016, 2016*
- [8] SEIFERT, W.-MELZER, B.: *Rechnerische Auswertung von Zeitstandversuchen am Beispiel des Stahles 13CrMo4-4.15. Vortragveranstaltung „Langezeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, Düsseldorf, 06.11.1992.*

REJSTŘÍK AUTORŮ

A		K	
Andreovský Jan.....	57	Kamenický Jan.....	119
B		Kárník Dalibor.....	127
Bátěk David.....	23	Kasl Josef.....	53
Beran David.....	71	Kobzová Alena.....	123, 127
Brabec Petr.....	137	Konop Radek.....	13
Buršík Ondřej.....	45	Konopík Pavel.....	107
C		Kopřiva Radim.....	45
Cizner Josef.....	49	Krajčovič Marián.....	19
Cvešpr Pavel.....	141	Kratochvíl Libor.....	87
Č		Kronďák Martin.....	123, 127
Čančura Zdeněk.....	63	Krum Stanislav.....	53
Čech Jan.....	71, 155	L	
Černý Miroslav J.....	149	Lacza Jakub.....	41
Černý Václav.....	91	Lopoš Ivan.....	19
Čmakal Josef.....	145	Lutovinov Maxim.....	37
D		M	
Douda Jindřich.....	145	Mareš Petr.....	57
Ducháček Petr.....	63	Marešová Barbora.....	45
Džugan Ján.....	37, 107	Marková Jana.....	115
E		Matějová Miroslava.....	53
Ernestová Miroslava.....	41	Materna Aleš.....	45
Ertl Jakub.....	9	Měšťánek Petr.....	37
F		Mikuš Milan.....	19
Fiedler Jan.....	27	Mlčoch Jan.....	115
H		Mlnařík Jakub.....	49
Hakl Jan.....	155	Molnár Jan.....	115
Havelková Libuše.....	155	Moravec Jaromír.....	71, 79
Horník Jakub.....	53	Muzika Lukáš.....	131
Horváth Jakub.....	97, 103, 151	N	
Horváth Ladislav.....	103, 133, 151	Nesládek Martin.....	37
Hruška Jan.....	49	Neumannová Šárka.....	155
Ch		Novák Václav.....	45
Chvostová Eva.....	107	Nováková Iva.....	79
J		P	
Janovec Jiří.....	97, 103, 133, 151	Palán Marek.....	63
Junek Michal.....	97, 133, 145	Pečínka Ladislav.....	83
Jurenka Josef.....	37	Pecharová Jana.....	53
		Petelová Petra.....	45
		Pluhař Dušan.....	5
		Polach Pavel.....	91
		Poledna Martin.....	67
		Prešl Kamil.....	115
		R	
		Richter Tomáš.....	71
		Růžička Milan.....	37

S

Ságl Pavel	119
Skála Jiří	131
Skála Zdeněk	111
Slováček Marek	71
Soukup Tomáš	13
Stainer Lukáš	111
Suchanová Helena	127
Svoboda J.	83
Svobodová Marie	133, 145
Sýkora Miroslav	115

Š

Švantner Michal	131
-----------------------	-----

T

Tejc Josef	71
Tesař Jiří	131

V

Václavík Jaroslav	91
Veselý Stanislav	31
Vít Jan	111
Vlasák Tomáš	155
Vlček Svatopluk	23

W

Wandrol Jan	1
-------------------	---

Z

Zajíček Jaroslav	119
Zuna Petr	53

Ž

Žamboch Miroslav	83
Žďárek Jiří	23

Kolektiv autorů

Sborník z 12. konference

„Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách“

Srní, 17. – 19. říjen 2017

Západočeská univerzita v Plzni

Vydavatelství

P. O. Box 314

Univerzitní 8

306 14 Plzeň

Redigoval: Lukáš Stuna

Počet stran: 207

Vydání první

Náklad: 200 výtisků

Příspěvky ve sborníku byly recenzovány.

Recenzi provedli: Petr Zuna, Václav Liška, Miroslav Balda a Radovan Šťastný

ISBN 978-80-261-0741-5

© Vydala Západočeská univerzita v Plzni v roce 2017