

VYSOKOTEPLTNÍ ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ HOMOGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

HIGH TEMPERATURE ULTRASONIC TESTING OF HOMOGENOUS WELDED JOINTS

Jana Veselá a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Laboratorní ultrazvukové zkoušení svarového spoje bylo realizováno na trubkových tělesech o rozměru 89 x 6 mm. Zkoušení bylo realizováno k ověření zkušebního systému z pohledu detekce zvoleného typu vad při zvolené teplotě. Zkušební systém zahrnuje ultrazvukový, chladičí a manipulační podsystémy. Zkoušení bylo v první etapě realizováno v rozsahu teplot od 50 °C do 350 °C v kroku po 50 °C na trubkových tělesech. Cílem bylo ověřit vysokoteplotní klíny, systém chlazení, vysokoteplotní vazební prostředek i manipulátor SKOOT HT s ohledem na teplotu, dobu expozice i prostorové požadavky celého systému. Součástí ultrazvukového systému je software určený k simulaci ultrazvukového zkoušení do teploty 350 °C.

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

Abstract

Laboratory ultrasonic testing of the welded joint was performed on tubular bodies measuring 89 x 6 mm. The testing was performed to verify the test system in terms of detecting the selected type of defects at the selected temperature. The test system includes ultrasonic, cooling, and handling subsystems. The testing was carried out in the first stage in the temperature range from 50 °C to 350 °C in steps of 50 °C on tubular test pieces. The aim was to verify the high-temperature wedges, the cooling system, the high-temperature coupling means, and the SKOOT HT manipulator regarding the entire system's temperature, exposure time, and space requirements. The ultrasonic system includes software designed to simulate ultrasonic testing up to a temperature of 350 °C.

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

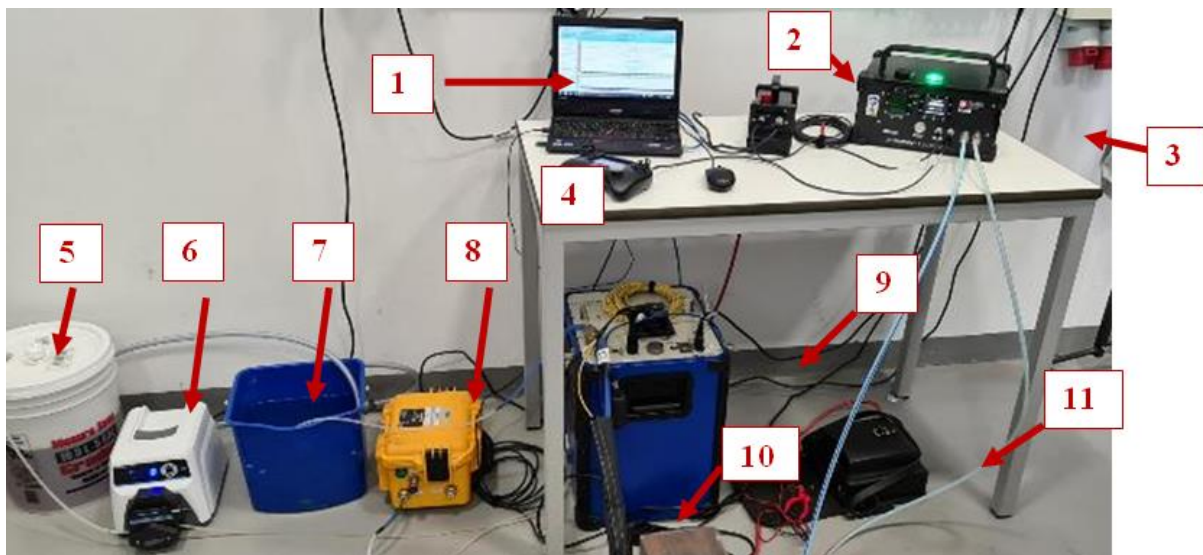
Úvod

První etapa zkoušení trubek 89 x 6 mm byla realizována v celém rozsahu teplot, které zkušební systém, zejména ultrazvuková sonda s klínem umožňují. Další vývoj, blíže popsáný v článku, v oblasti ultrazvukového zkoušení za zvýšených teplot (HT PAUT) se zaměřil na podmínky reálného zkoušení na elektrárně. Tomuto odpovídají desková zkušební tělesa z uhlíkových ocelí pokrývající potrubí větších průměrů sekundárního okruhu jaderných elektráren, o vnějším průměru nad 370 mm, tloušťce stěny 10 a 25 mm se svarovými spoji. Cílem bylo ověřit detekci a sizing navržených dvou typů vad: elektrojiskrově obráběných vrubů (EDM) a

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

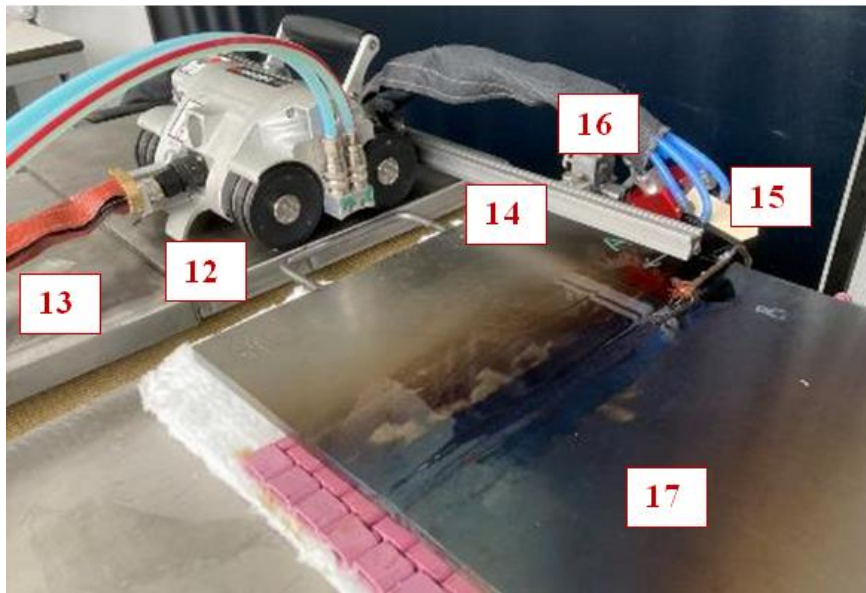
Zkušební systém HT PAUT

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



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

Obr. 1: Zkušební systém používaný při HT PAUT

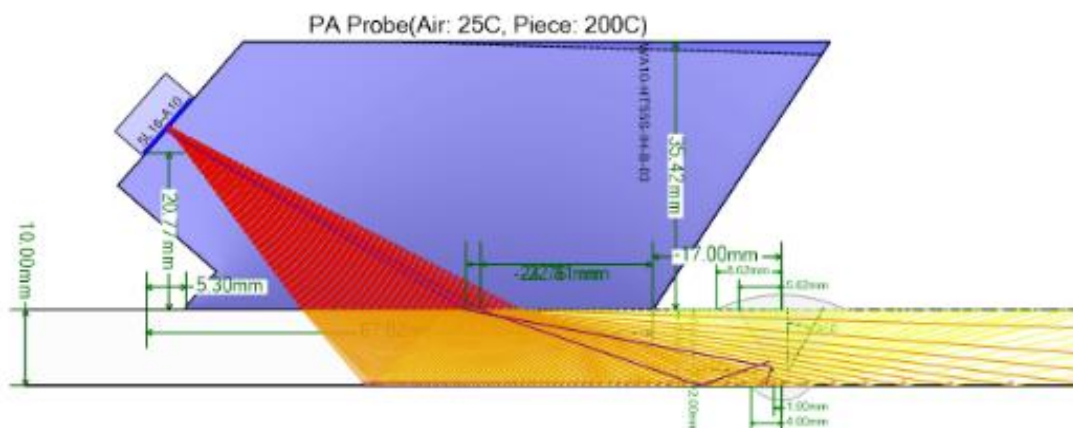


12 – manipulátor SKOOT HT, 13 – přívodní kabel, 14 – rameno pro uchycení sondy, 15 – sonda s klínem, 16 – držák sondy, 17 – deskové ZT

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

SW BeamTool9

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



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

Měrky a zkušební tělesa

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

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

Tab. 1: Značení zkušebních těles

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

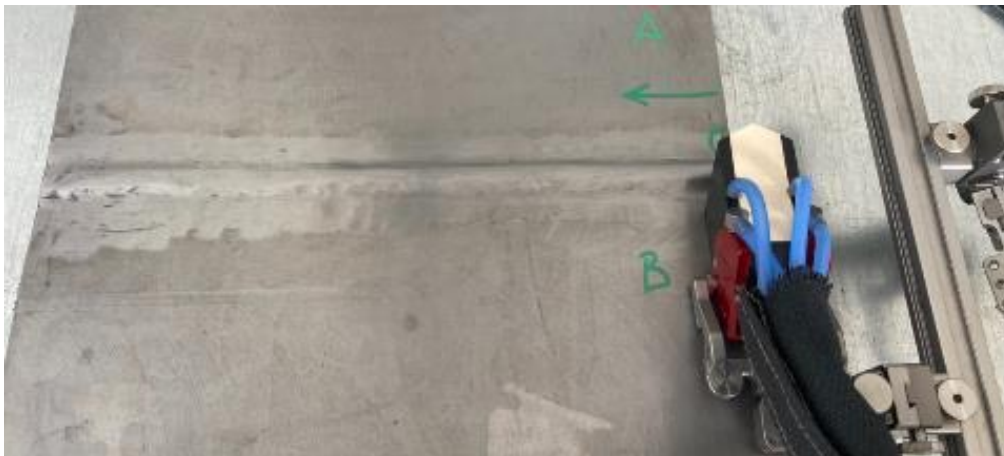
Délka tělesa byla zvolena s ohledem na umístění manipulátoru včetně ramínka pro upevnění PA sondy. Umístění svarového spoje, tj. vzdálenost od čela desky byla zvolena s ohledem na možnosti výroby náhradních vad typu EDM nebo PISC-A v kořenové oblasti svaru.

Deska z materiálu 11 373 o rozměrech 750 x 350 x 10 mm s tupým svarem typu V byla označena jako těleso ZKT 10 a obsahuje 3 vruby typu EDM. Druhé těleso o rozměrech 450 x 350 x 25 mm s tupým V svarem, označené jako ZKT 25 bylo vyrobeno z oceli 12 021.1 a do tělesa byly vyjiskřeny tři vruby typu PISC-A.

Ultrazukové zkoušení

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

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

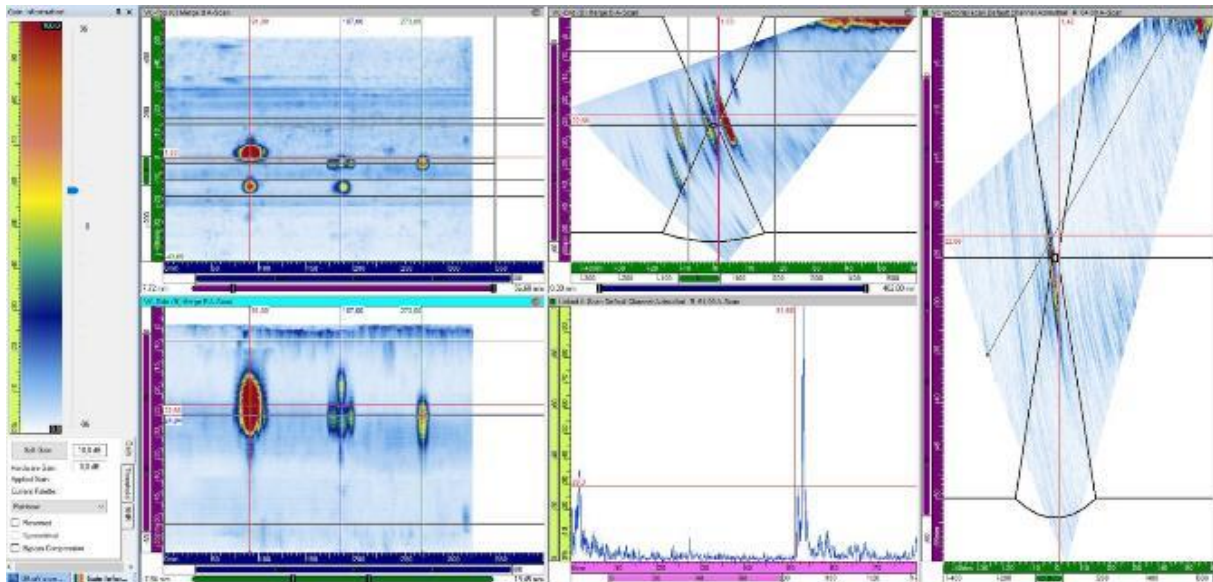


Vstupní ultrazukové měření bylo provedeno na obou ZT při pokojové teplotě. Při měření z obou stran svarového spoje, strany označeny A a B byly detekovány vždy všechny tři vruby typu EDM i PISC-A. Byl zjištěn vliv pohybu sondy na měřené výsledky, tedy zda je sonda tlačena ramínkem, nebo tažena za ramínkem.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

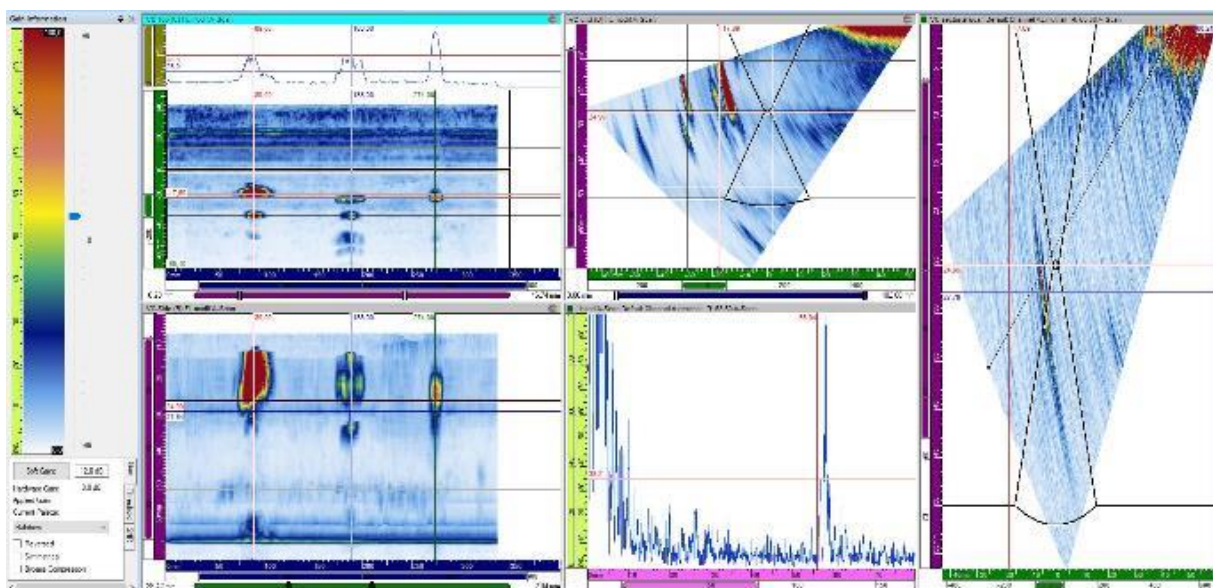
Obr. 4: Zkušební těleso ZKT 10 s vyznačením stran svaru a směrem zkoušení

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

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



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



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

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

Závěr

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

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

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

Poděkování

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

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

Literatura

- [1] GINZEL, R, MARVASTI, MH and SINCLAIR, AN, Practical Ultrasonic Phased Array Elevated Temperature Technique Development. *Material Science. Insight*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 256-263. <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.5.256>
- [2] MARVASTI MH and SINCLAIR AN (2014) Phased array inspection at elevated temperatures. *Material Science IEEE International Ultrasonic Symposium*. 2014 <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2014.0210>
- [3] MCLAY A and VERKOOIJEN J (2012) Ultrasonic inspections at elevated temperature. *Insight*, 2012, vol. 54, Nr. 6, pp. 307-310(4). <https://doi.org/10.1784/insi.2012.54.6.307>
- [4] ATKINSON I, GREGORY C, KELLY SP and KIRK KJ, Ultrasmart: Development in ultrasonic flaw detection and monitoring for elevated temperature plant applications, *ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2007 <https://doi.org/10.1115/CREEP2007-26411>
- [5] MCMILLAN JD and VOLLERT DK, High-Temperature Ultrasonic Examination and Sizing of Thermal Fatigue Cracking in Reactor Effluent Piping, *ASME 2005 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2005, PVP2005-71779, pp. 133. <https://doi.org/10.1115/PVP2005-71779>
- [6] EPRI, *Elevated-Temperature Nondestructive Evaluation Development and Application*, technical report 3002010302, 2017