

Charakterisierung von Spannungskorrosionsrissen mittels bildgebender Ultraschallverfahren

Oliver NEMITZ*, Thomas ORTH*, Till SCHMITTE*, Sandra DUGAN**, Anne Jüngert**, Hans RIEDER***, Martin SPIES***

*Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF), Ehinger Straße 200, 47259 Duisburg, Tel. +49-203-999-3234, Email T.Orth@du.szmf.de

**Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Tel. +49-711-685-62700, Email Anne.Juengert@mpa.uni-stuttgart.de

***Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E31, 66123 Saarbrücken, Tel. +49-681-9302-3612, Email Martin.Spies@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Für stark verzweigte Risse können amplitudenbasierte Ultraschallverfahren zur Größenbestimmung versagen. Solche Risse entstehen beispielsweise durch interkristalline Spannungsrisskorrosion, dies betrifft bei Mischnähten vor allem das Schweißgut aus Nickellegierungen, bei einigen austenitischen Cr-Ni-Stählen auch die Wärmeeinflusszone. In diesem Beitrag befassen wir uns mit der Detektion und Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen (SKR) unter Einsatz von bildgebenden Verfahren. Mehrere Testkörper mit interkristallinen SKR mit Tiefen von 2.5 mm bis 16 mm wurden mittels konventioneller Prüftechniken zur Akquisition der B-Scan-Daten und anschließender SAFT-Verarbeitung untersucht. Weitere Untersuchungen wurden mittels Phased-Array-Technik und den Verfahren FMC und TFM durchgeführt.

1. Einführung

Verschiedene Alterungsmechanismen in kerntechnischen Anlagen erfordern die Verbesserung von Ultraschallprüfverfahren im Hinblick auf die Fehlerdetektion und die Fehlergrößenbestimmung [1]. Auf das Auftreten von im Betrieb entstandenen Schäden an Mischschweißverbindungen in verschiedenen ausländischen kerntechnischen Anlagen [2] hat man in Deutschland mit entsprechenden Untersuchungen reagiert. Das Problem der Rissbildung und des Risswachstums durch interkristalline Spannungsrisskorrosion betrifft bei Mischnähten vor allem das Schweißgut aus Nickellegierungen, während bei diesbezüglich anfälligen austenitischen Cr-Ni-Stählen neben der Schweißnaht auch die Wärmeeinflusszone betroffen ist. Zusätzlich zu den bekannten Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung dieser Schweißnähte kann bei interkristallinen Spannungskorrosionsrissen die Fehlerbewertung durch die Risseigenschaften erschwert sein. Für solche stark verzweigten Risse können amplitudenbasierte Ultraschallverfahren zur Größenbestimmung versagen, da die Fehlersignale erheblich durch die komplexe Rissgeometrie und die dadurch bedingte diffuse Streuung beeinflusst werden [3]. Damit sinkt gleichzeitig die Verlässlichkeit des Ultraschallverfahrens zur Fehlergrößenbestimmung [4].



In diesem Beitrag betrachten wir daher die Detektion und die Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen in austenitischen Stählen mittels bildgebender Ultraschallverfahren. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses der konventionell aufgenommenen Ultraschallprüfdaten, insbesondere für die Rissspitzenanzeigen, verwenden wir die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT) [5-8]. Der Einsatz der Phased-Array-Technik erfolgt mit dem zum klassischen Beam-Forming-Verfahren alternativen FMC-Ansatz. Die Vorgehensweise bei der ‚Full-Matrix-Capture‘ (FMC) besteht darin, alle paarweisen Sender-Empfänger-Elementkombinationen bei der Datenaufnahme durchzutakten und so die volle Daten-Matrix aufzuzeichnen. Die Bildgebung mittels der sogenannten Total Focusing Method (TFM) erfolgt dann durch Anwendung der Delay Laws zum Fokussieren durch algorithmische Datenverarbeitung. Mehrere Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen mit durchschnittlichen Tiefen von 2.5 mm bis 16 mm wurden untersucht, wobei Ergebnisse vergleichender Untersuchungen mittels Farbeindring- und Durchstrahlungsprüfung zur Verfügung standen.

2. Geometrie interkristalliner Spannungskorrosionsrisse

Interkristalline Spannungskorrosionsrisse unterscheiden sich von künstlichen Fehlern wie Nuten und auch von ermüdungsbedingt entstandenen Rissen in ihrer Geometrie und in der Struktur der Rissflächen. Im Gegensatz zu Nuten und Schwingrissen, die eine sehr glatte, senkrecht zur Ausgangsoberfläche orientierte Rissfläche aufweisen, verlaufen Spannungskorrosionsrisse entlang der Korngrenzen und sind in vielen Fällen verzweigt oder verästelt, so dass eine raue, unregelmäßig orientierte Rissfläche vorliegt. Abbildung 1 zeigt den Vergleich zwischen einem Schwingriss und einem interkristallinen Spannungskorrosionsriss in austenitischem Grundwerkstoff. Interkristalline Spannungskorrosionsrisse in der Wärmeeinflusszone an Schweißnähten verlaufen in vielen Fällen zunächst unverzweigt beispielsweise entlang der Schmelzlinie und verästeln erst ab einer gewissen Tiefe; ein Beispiel ist in Abbildung 1, rechts gezeigt.

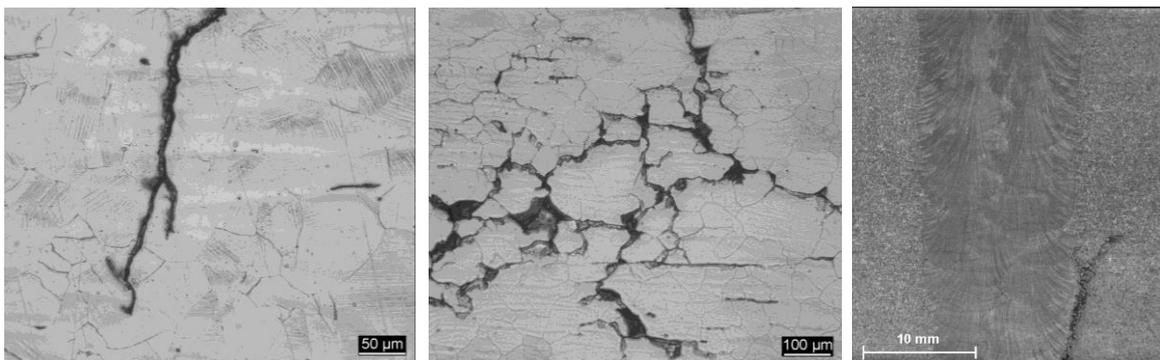


Abb. 1 Schwingriss (links) und interkristalliner Spannungskorrosionsriss in austenitischem Grundwerkstoff (Mitte) sowie entlang einer austenitischen Schweißnaht (rechts).

3. Eingesetzte Prüftechniken – Phased Array, FMC und TFM, SAFT

Leistungsfähige konventionelle Ultraschalltechniken beispielsweise zur Inspektion von Schweißnähten arbeiten mit der Winkeleinschallung von Longitudinal- und Transversalwellen von beiden Seiten der Schweißnaht. Dabei ist der Sende-Empfangs-Betrieb, aber auch der Impuls-Echo-Betrieb oder eine Kombination beider möglich [7]. Der Einsatz von 3D-SAFT hat sich als im Hinblick auf die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses als äußerst leistungsfähig erwiesen. SAFT ist daher zur Anhebung der Rissspitzenansignale

vorteilhaft, die in vielen Fällen im (Korn-)Rauschen verschwinden. Im Gegensatz zu (ebenen) Ermüdungsrissen sind Spannungskorrosionsrisse ‘stumpf’ [9], was zu einer zusätzlichen Schwächung der Rissspitzen signale führt. Um die Risslänge zuverlässig zu bestimmen und damit eine Vermaßung der Risse durchzuführen, bietet sich die Rekonstruktion der Rissspitzen signale und der Winkelspiegelanzeigen durch SAFT an.

Beim Einsatz von Phased-Array-Verfahren bietet sich neben dem klassischen Beamforming die Total Focusing Method (TFM) an, die dabei gerne als der „Gold Standard“ bezeichnet wird, weil sich theoretisch eine optimale Fokussierung in einem abzubildenden Gebiet dadurch erreichen lässt, dass alle Sender-Empfänger-Paare separat aufgezeichnet werden (Full Matrix Capture, FMC) und in der Nachbearbeitung der Daten die Verzögerungs-gesetze sukzessiv für jede Gitterzelle des abzubildenden Gebiets angewendet werden [10]. Der Preis für diese Nutzung der vollen Bildinformation ist die große anfallende Daten-menge und der damit verbundene signifikante Rechenaufwand des Verfahrens. Dieser Nachteil tritt jedoch durch leistungsfähigere Generationen von Prozessoren, Grafikkarten und FPGAs zunehmend in den Hintergrund [11,12]. In [13] und [14] wurde das TFM-Verfahren beispielsweise zur Detektion und Größenbestimmung von unverzweigten Rissen bzw. rissartigen Fehlern angewendet. TFM zur Untersuchung von ferritischen Schweißnähten von Großrohren findet sich in [15], während sich [16] mit der Geometrie-Rekonstruktion austenitischer Schweißnähte beschäftigt.

4. Ergebnisse für IKSKR-Proben aus austenitischem Grundmaterial

Wir haben mehrere austenitische Stahlproben (quaderförmig, Länge 320 bzw. 350 mm, Breite 40 mm, Wanddicke 32 mm) mit den verschiedenen Ultraschallverfahren untersucht, mit dem Ziel interkristalline Spannungskorrosionsrisse (IKSKR) zu detektieren. Mehrere Testkörper mit solchen Rissen, die über die ganze Probenbreite verlaufen, standen zur Verfügung. Die durchschnittlichen Risstiefen liegen im Bereich von 2.5 mm bis 16 mm und wurden mittels Farbeindringprüfung jeweils an beiden Seiten der Probe und mittels Röntgendurchstrahlungsprüfung ermittelt. Die Ultraschallprüfung in konventioneller Prüftechnik erfolgte mit 3.5 MHz und 4 MHz Standard-Prüfköpfen, die mittels Vorlaufkeilen Transversalwellen unter einem Einschallwinkel von 45° erzeugen. Die Proben wurden jeweils in zwei Richtungen in Kontakttechnik definiert abgescannt (+45°, -45°). Die so mit den 3.5 MHz Prüfköpfen aufgenommenen HF-Daten wurden anschließend mit dem SAFT-Algorithmus bearbeitet.

Repräsentativ für die an den IKSKR-Proben erzielten Ergebnisse konzentrieren wir uns im Folgenden auf die Probe P35. Abbildung 2 zeigt ein konventionelles B-Bild für einen Linien-Scan im mittleren Bereich der Probe. Bei einer Prüffrequenz von 4 MHz lässt sich die Rissgeometrie schon recht gut abbilden, wenn – wie hier gezeigt – die mittels +45° und -45° Einschallwinkel aufgenommenen B-Bilder überlagert werden. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der SAFT-Rekonstruktion dargestellt. Die SAFT-B-Bilder zeigen die rekonstruierten Anzeigen in Projektion über die Probenbreite, insgesamt werden die Anzeigen wie erwartet etwas schärfer abgebildet. Die mittels Winkelspiegelecho und den verschiedenen, deutlich erkennbaren Rissspitzenanzeigen ermittelten Risstiefen liegen im Bereich von 13 mm bis 16 mm und stimmen hervorragend mit den mittels Eindring- und Röntgenprüfung ermittelten Werten aus Tabelle 1 überein. Überlagert man die Ergebnisse beider Rekonstruktionen (siehe [7]), so ergibt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung der rekonstruierten, verästelten Rissgeometrie im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren; dies ist in Abb. 4 dargestellt. Ähnlich gute, hier nicht gezeigte Ergebnisse wurden für die Probe P36 erzielt, für die ebenfalls Abbildungen der tatsächlichen Rissgeometrie zur Verfügung standen.

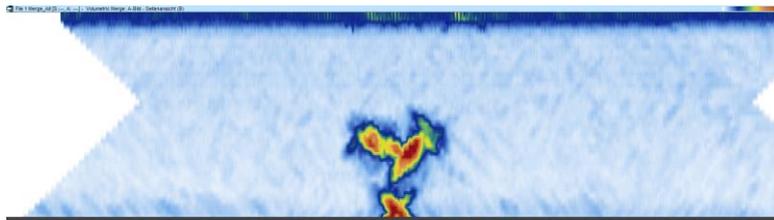


Abb. 2 Abbildung des Risses durch Überlagerung der mit $+45^\circ$ - und -45° -Winkelschallung aufgenommenen B-Bilder für Probe P35. Die Kontakttechnik-Prüfung erfolgte mit einem 4 MHz-Prüfkopf.

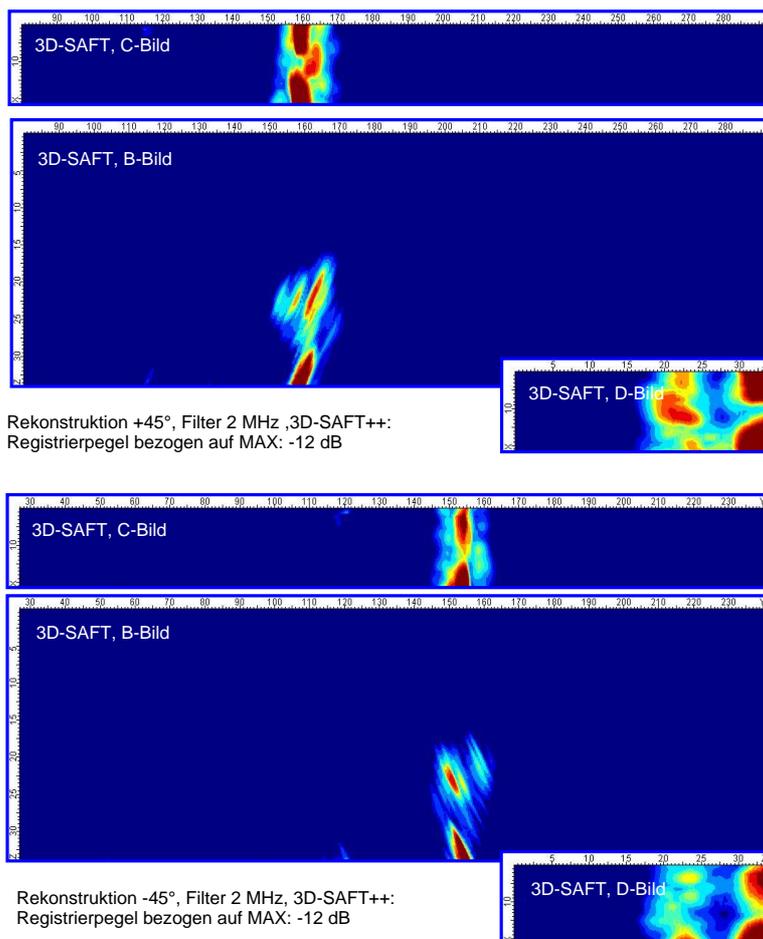


Abb. 3 3D-SAFT-Rekonstruktionen für Probe P35 für $+45^\circ$ - (oben) und -45° -Winkelschallung (unten). Die Daten wurden mit einem 2 MHz-Filter vorverarbeitet; bei Einsatz eines 4 MHz-Filters ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede.

Abbildung 5 zeigt zum Vergleich TFM-Rekonstruktionen für Probe 35 durchgeführt mit einem 5 MHz- und einem 10 MHz-Prüfkopf (Olympus 5L64 und 10L64 mit jeweils 64 Elementen) und einem Wasservorlauf von 35 mm. Die Verästelung des Risses ist in beiden Fällen klar erkennbar, erscheint jedoch im Falle der höheren Frequenz noch feiner aufgelöst. Rekonstruktionen in verschiedenen Abständen zur Vorderseite der Probe zeigen weiterhin, dass sich die Gestalt des Risses zum Innern der Probe hin ändert. Zu beachten ist, dass im Vergleich zu den mittels konventioneller Prüftechnik durchgeführten Untersuchungen die FMC-Datenaufnahme bei einer festen Prüfkopfposition und damit einem eingeschränkten Winkelbereich durchgeführt wurde. In den TFM-Abbildungen fehlen daher die Winkelspiegelanzeigen im unteren Rissbereich.

Die an den Proben 35 und 36 ermittelten Risstiefen sind in Tabelle 1 den mittels Farbeindring- und Röntgenprüfung bestimmten Werten gegenübergestellt und zeigen sehr gute Übereinstimmung.

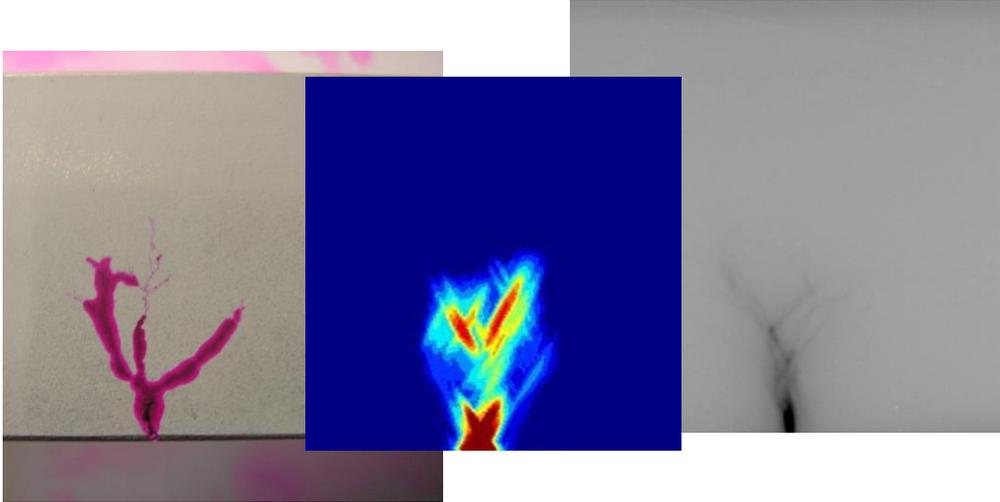


Abb. 3 Vergleich der Rissabbildung mittels Farbeindringprüfung (links), Ultraschall und SAFT (Mitte) sowie Röntgenschichtstrahlungsprüfung (rechts) für Probe P35 (die Skalen stimmen nicht exakt überein).

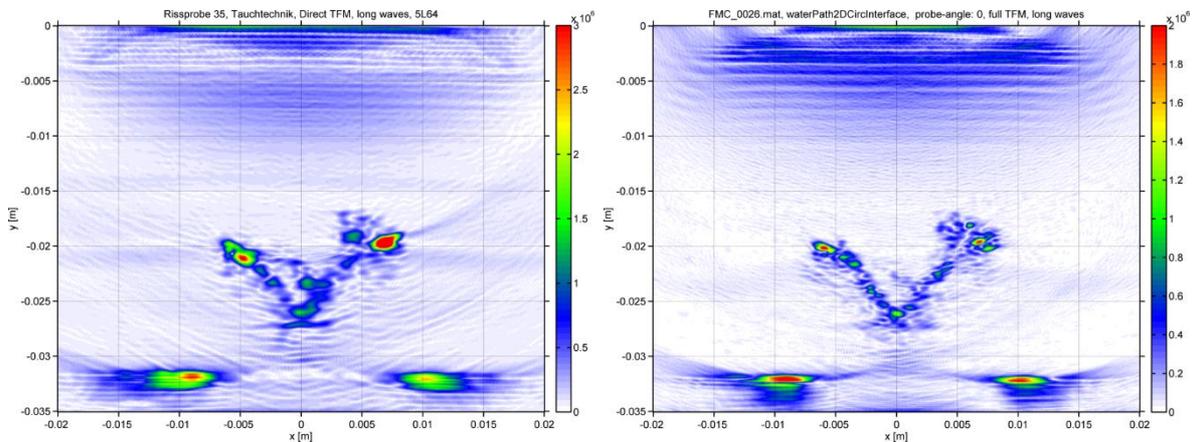


Abb. 4 TFM-Rekonstruktionen für Probe 35, Prüffrequenz 5 MHz (links) und 10 MHz (rechts). Beim Vergleich mit den Abbildungen 2 und 3 hinsichtlich der Gestalt des Risses ist zu beachten, dass die Skalierung der TFM-Rekonstruktionen nicht exakt mit der der SAFT-Rekonstruktionen übereinstimmt. Weiterhin unterscheidet sich die Gestalt des Risses am Rand der Probe (Farbeindringprüfung) von seiner der Gestalt im Innern.

Probe	Risstiefe	Risstiefe SAFT	Risstiefe TFM
P35	13-19 mm	13-16 mm	12-16 mm
P36	9-12 mm	10-13 mm	10-13 mm

Tabelle 1 Ermittelte Riss- und Nuttiefen der Farbeindring- und Röntgenprüfung sowie der SAFT- und TFM-Rekonstruktionen.

5. Zusammenfassung

Wir haben Ultraschalluntersuchungen mittels konventioneller Prüftechniken durchgeführt, um interkristalline Spannungskorrosionsrisse in austenitischen Stahlproben zu detektieren und um deren Länge zu bestimmen. Eine weitere Verbesserung der Rissabbildung ergab sich aus der Nachbearbeitung der Ultraschall-HF-Daten mit dem SAFT-Algorithmus. Wir haben gezeigt, dass die 3D-SAFT-Bildgebung eine weitergehende Bewertung der Ultraschalldaten und die verlässliche Risslängenbestimmung erlaubt. In der hier adressierten Anwendung hat sich insbesondere bei der Verstärkung der Rissspitzensignale der Spannungskorrosionsrisse bemerkbar gemacht. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die Verästelungen der Risse mittels TFM-Rekonstruktionen – zum Preis eines höheren Rechenaufwands – noch feiner aufgelöst werden konnten. Die ermittelten Rissgrößen zeigen für beide Verfahren eine sehr gute Übereinstimmung mit den mittels Durchstrahlungs- und Farbeindringprüfung ermittelten Werten. Zukünftige Arbeiten mit Blick auf das IKSKR-Problem bei austenitischen Schweißnähten werden folgen.

Referenzen

- [1] S.R. Doctor, Nuclear Power Plant NDE Challenges – Past, Present and Future, in: Review of Progress in QNDE, Vol. 26, AIP Conference Proceedings CP894, 17-31 (2007)
- [2] Schäden an Mischnähten der Reaktordruckbehälterstutzen in den Kernkraftwerken Virgil C. Summer (USA) und Ringhals 4 (Schweden) entdeckt im Herbst 2000. GRS-Weiterleitungsnachricht WLN 2001/05, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln (2001)
- [3] S. Dugan, S. Wagner, S. Zickler, Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung, DGZfP-Berichtsband BB122–CD, Jahrestagung 2010, Di.2.B.3
- [4] J.A. Ogilvy, Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York (1991)
- [5] S.R. Doctor, G.J. Schuster, L.D. Reid, T.E. Hall, Real-Time 3D SAFT UT System Evaluation and Validation, Report Pacific Northwest National Laboratory, USA, NUREG/CR-6344 PNNL-10571 (1996)
- [6] V. Schmitz, Nondestructive Acoustic Imaging Techniques, in Imaging of Complex Media with Acoustic and Seismic Waves, Topics Appl. Phys. 84, edited by M. Fink et al., Springer, Berlin (2002), 167-190
- [7] H. Rieder et al., SAFT- und TOFD-Auswertung für die Ultraschall-Schweißnahtprüfung von längsnahtgeschweißten Großrohren, DGZfP-Berichtsband BB122–CD, Jahrestagung 2010, Mi.2.A.1
- [8] M. Spies, H. Rieder, Synthetic Aperture Focusing of Ultrasonic Inspection Data to Enhance the Probability of Detection of Defects in Strongly Attenuating Materials, NDT&E International, 43 (2010), 425-431
- [9] H.M. Nykyforchyn, W. Dietzel, Investigations of the Influence of the Mechanical Conditions at the Crack Tip on SCC Test Results, in: Proceedings of the 13th European Conference on Fracture, ECF 13, Sept. 6-9, 2000, San Sebastian, CD-ROM
- [10] Holmes, C; Drinkwater, B. W.; Wilcox, P. D.: *Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation*. NDT&E International, 38 (2005) 701-711
- [11] Sutcliffe, M.; Weston, M.; Dutton B.; Charlton, P.; Donne, K.: *Real-Time Full Matrix Capture for Ultrasonic Non-Destructive Testing with Acceleration of Post-Processing through Graphic Hardware*, NDT&E International, 51 (2012) 16-23
- [12] Cruza, J. F.; Perez, M; Moreno, J. M.; Fritsch, C.: *Real time fast ultrasound imaging technology and possible applications*, Physics Procedia 63 (2015) 79-84
- [13] Felice, M.; Velichko, A.; Wilcox, P. D.: *Accurate Depth Measurement of Small Surface-Breaking Cracks Using an Ultrasonic Array Post-Processing Technique*. NDT&E International, 68 (2014) 105-112.
- [14] Zhang, J.; Velichko, A.; Drinkwater, B. W.; Wilcox, P. D.: *The Characterization of Crack-Like Defects Using Ultrasonic Images*. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 29 (AIP, 2010) 895-902
- [15] Schmitte, T.; Nemitz, O.; Chichkov, N.; Orth, T.: *Application of the Total Focusing Method for Improved Defect Characterization in the Production of Steel Tubes, Pipes and Plates*, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016
- [16] Ten Grotenhuis, R.; Chen, A.; Hong, A.; Verma, Y.: *Application of a FMC/TFM Ultrasonic System to Inspection of Austenitic Welds*, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016