

PVP2013-9709

**DEVELOPPEMENT ET EVALUATION D'UN SYTEME DE CONTROLE
ULTRASONORE DE TUYAUX EN POLYETHYLENE**

Malcolm Spicer

TWI Ltd

Granta Park, Great Abington, Cambridge

CB21 6AL, UK

Tel: +44 1223 899000

Email: malcolm.spicer@twi.co.uk

Mike Troughton

TWI Ltd

Granta Park, Great Abington, Cambridge

CB21 6AL, UK

Tel: +44 1223 899000

Email: mike.troughton@twi.co.uk

Fredrik Hagglund

TWI Ltd

Granta Park, Great Abington, Cambridge

CB21 6AL, UK

Tel: +44 1223 899000

Email: fredrik.hagglund@twi.co.uk

RESUME

L'American Society of Mechanical Engineers (ASME) est en train d'élaborer un Code (N-755) pour l'utilisation du polyéthylène (PE) dans les systèmes de canalisations enterrées des centrales nucléaires. Cependant, la Commission de Règlementation Nucléaire (NRC) des États-Unis n'a pas approuvé ce Code en raison d'un certain nombre de préoccupations; l'une d'elles est l'absence de techniques validées d'examen non destructif (END) pour l'inspection des joints soudés dans les tuyaux PE. Cet article décrit la mise au point d'un système de contrôle ultrasonore multiélément et des procédures pour l'inspection de joints soudés dans des tubes PE de diamètres compris entre 125 et 1000mm. Le système comprend du matériel et des logiciels spécialement conçus pour l'inspection des joints de tuyaux PE. Le système a été évalué par un certain nombre d'organisations et les résultats de ces essais seront présentés. Parallèlement au développement du système d'inspection, un important programme de travail a été mis en oeuvre pour élaborer des critères d'acceptation des défauts dans les soudures de tubes PE. Les types de défauts étudiés comprennent la contamination particulaire, les défauts plans et les fusions froides. Les tailles de défauts critiques et les niveaux de contamination ont été déterminés sur la base d'essais à long terme et à court terme de joints soudés dans des tuyaux PE.

INTRODUCTION

Les tuyaux PE offrent des avantages significatifs par rapport à d'autres matériaux, tels que la fonte, l'acier et le béton, pour le transport de fluides tels que le gaz naturel et l'eau. Ils ne se corrodent pas, ont une durée de vie prévue plus longue, sont moins coûteux à installer en raison de leur légèreté et de leur flexibilité, et ont des taux de fuite significativement plus bas grâce à un système entièrement soudé. Cependant, leur utilisation dans des environnements critiques pour la sécurité, tels que la tuyauterie d'admission d'eau de refroidissement dans les centrales nucléaires [1], est limitée par l'absence d'une méthode NDE fiable et validée. Plusieurs études ont été menées pour développer des méthodes de NDE pour les joints soudés bout à bout (BF) [2-6] et par électro-fusion (EF) [7-9]. Cependant, ceux-ci ont été limités à une gamme étroite de tailles de tuyaux et / ou n'ont pas inclus les critères d'acceptation. Cet article décrit les progrès réalisés dans le développement du système d'inspection par ultrasons présenté pour la première fois à la Conférence PVP 2012 [10].

PROCEDE DE SOUDAGE BOUT A BOUT

Le soudage par fusion bout à bout, également connu sous le nom de soudure plaque chaude, poly-fusion, soudure miroir ou platine (figure 1), est utilisé pour souder des tuyaux en PE de tailles typiquement comprises entre 50 et 2000 mm de diamètre.



FIG. 1 SOUDAGE BOUT A BOUT TUYAUX PE

La technique utilise une plaque métallique chauffée, connue sous le nom de plaque chauffante ou plaque de chauffage, pour chauffer et faire fondre les extrémités des tuyaux en PE. Une fois que les extrémités sont suffisamment fondues, la plaque chauffante est retirée et les tuyaux sont réunis sous pression pour former la soudure.

PROCEDE DE SOUDAGE PAR ELECTROFUSION

Dans le soudage EF, les extrémités des tuyaux sont poussées dans chaque extrémité d'un raccord (Figure 2), qui contient une bobine de fil chauffant à l'intérieur. Le courant passe à travers la bobine, qui chauffe et fait fondre l'intérieur des raccords et l'extérieur des tuyaux, produisant une soudure (figure 3).



FIG. 2 JOINT D'ELECTROFUSION



FIG. 3 SECTION D'UN JOINT EF MONTRANT LA POSITION DES FILS DE SOUDAGE

Le PROJET TESTPEP

Le projet TestPEP financé par l'Europe implique 17 organisations de sept pays européens. Il s'agit d'un projet de trois ans, lancé en février 2010 et d'une valeur totale de 3,5 M €. Son but est de concevoir, fabriquer et valider un système de contrôle par ultrasons multiéléments qui peut être utilisé pour inspecter les joints BF et EF dans les tuyaux en PE, adapté à une utilisation terrain et simple à utiliser. Le concept est d'avoir un instrument dans une « boîte noire », directement connecté au scanner, avec une connexion Ethernet simple pour télécharger les données enregistrées. Parallèlement, l'importance de la taille et de la quantité des défauts sera établie par rapport aux besoins de service, qui seront obtenus par des essais mécaniques à long terme des joints contenant des défauts connus et une comparaison avec les résultats des soudures sans défauts. Le projet a été divisé en plusieurs lots de travaux techniques basés sur les spécifications suivantes:

- Matériaux
 - PE80 et PE100
- Taille de tuyaux
 - 180mm SDR 17
 - 225mm SDR 11
 - 355mm SDR11
 - 450mm SDR 17
 - 710mm SDR 17
- Types de défauts
 - Contamination des particules fines (poussière)
 - Contamination grossière des particules (sable, sable)
 - Les défauts planaires (empreintes digitales, huile et graisse, gouttelettes de pluie)
 - Soudures à froid
 - Sous-pénétration des tuyaux dans les joints EF
- Distance de travail minimum autour du joint de tuyau
 - 200mm

FABRICATION DES JOINTS SOUDES

Un certain nombre de joints soudés contenant des simulations des types de défauts définis dans la spécification ont été réalisés dans les matériaux PE, les types de joints et les tailles de tuyaux également définis dans la spécification.

Puisque, pour l'évaluation des NDE et les critères d'acceptation, il est nécessaire de connaître la taille et / ou la quantité exacte de chaque défaut, la plupart des défauts choisis étaient des simulations idéales de défauts réels pouvant être rencontrés sur le terrain :

- Talc micronisé (granulométrie <math><45 \mu\text{m}</math>) - pour simuler la contamination par des particules fines.
- Sable siliceux calibré (granulométrie 150 - 300 $\mu\text{m}</math>) - pour simuler la contamination des particules grossières.$

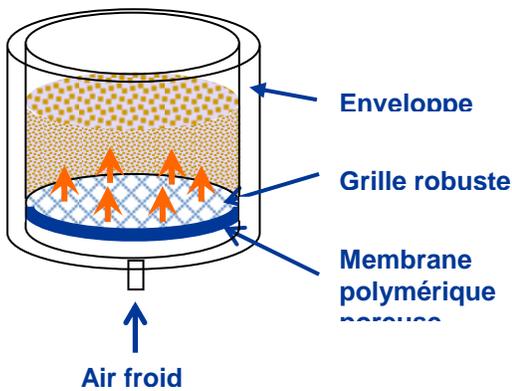


FIG. 4 REPRESENTATION DIAGRAMATIQUE DU LIT DE SABLE FLUIDISE



FIG. 5 LIT DE SABLE FLUIDISE CHAUFFE

- Disques en aluminium (25 μm d'épaisseur, 1-50mm de diamètre) - pour simuler des défauts planaires.

Des disques en aluminium ont été utilisés car des travaux antérieurs ont montré que, pour le CND par ultrasons, ils constituent une bonne simulation des défauts planaires réels [2]. Des procédures d'insertion des défauts ci-dessus dans les articulations EF et BF d'une manière reproductible ont été développées [10]. Par exemple, pour introduire un niveau uniformément reproductible de contamination particulaire grossière, un lit de sable fluidisé a été développé pour déposer un niveau prédéterminé de sable de silice gradué sur l'extrémité du tuyau avant le soudage (figures 4 et 5).

DEVELOPPPEMENT DES TECHNIQUES DE CND

Des techniques de contrôle par ultrasons multiéléments ont été développées pour la détection de défauts dans matériaux de tuyauterie en PE de tailles de tuyaux définis dans la spécification, y compris la conception et la fabrication de sondes ultrasonores multiéléments et de sabots de sonde. Les propriétés matérielles des matériaux PE choisis ont été déterminées [10, 11] ainsi que les méthodes pour surmonter la vitesse acoustique très lente et la nature fortement atténuante de ces matériaux, qui ont ensuite été incorporées dans la spécification de sonde ultrasonique.

En plus de ce travail, un logiciel de reconnaissance des défauts et de correction automatique des défauts est en cours de développement pour permettre au système d'inspection de fournir une indication de réussite / échec.

Pour inspecter les joints EF, le défi consistait à obtenir une résolution suffisamment bonne pour pouvoir inspecter la zone de fusion au-delà des fils chauffants. Puisque l'atténuation de l'ultrason augmente rapidement avec la fréquence dans les matériaux de PE [10] la solution la plus appropriée est un compromis; la fréquence doit être suffisamment basse pour permettre au son de se propager à la distance requise mais suffisamment élevée pour atteindre la résolution désirée. Cela nécessitait des choix de paramètres minutieux pour la sonde multiélément. L'approche consistait à utiliser un balayage linéaire normal focalisé sur la zone de fusion (Figure 6), en utilisant un nouveau sabot d'eau à face ouverte avec une jupe d'étanchéité qui est utilisée pour maintenir efficacement l'eau dans le sabot (Figure 7).

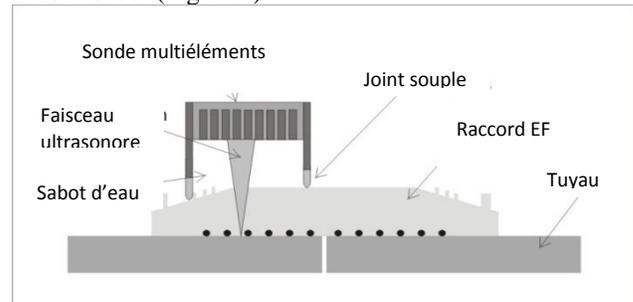


FIG. 6 SCHEMA DE LA TECHNIQUE DE CONTROLE DES JOINTS EF



FIG. 7 SABOT D'EAU ZERO DEGRE UTILISE POUR L'INSPECTION DES JOINTS EF

En utilisant la technique qui a déjà été développée dans le projet [10], une gamme de joints de tuyaux EF a été inspectée, ce qui a donné des résultats encourageants.

Les figures 8, 9 et 10 montrent une série d'images d'assemblages EF soudés dans un tube en PE de 180 mm. La figure 8 montre une bonne articulation sans défauts discernables. La figure 9 montre un joint avec des disques en aluminium de 8 mm et la figure 10 montre un joint avec un disque en aluminium de 2 mm démontrant qu'un manque de fusion d'au moins 2 mm de diamètre est facilement détectable. L'indication du bord supérieur de la ZAT est également visible sur la figure 8, bien que cela ne soit pas si évident sur les figures 9 et 10. Cette caractéristique peut être utilisée pour détecter des soudures à froid [8, 10]. En plus de cela, le signal

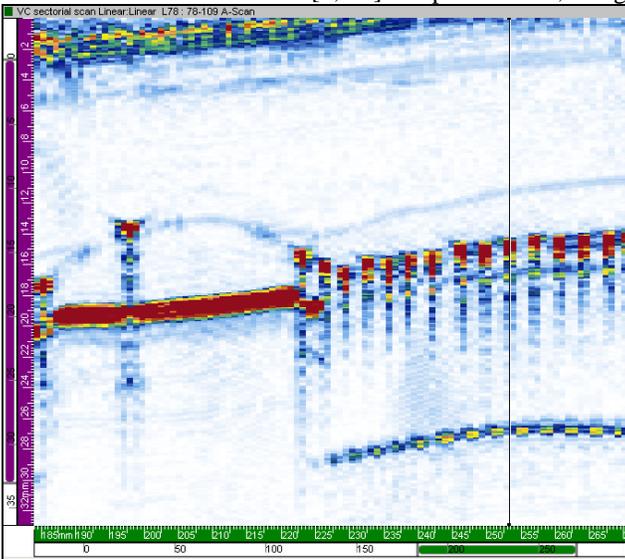


FIG. 8 IMAGE ULTRASON MULTIELEMENTS D'UN JOINT EF DE 180MM SANS DEFAUT

de la surface intérieure du tuyau peut être clairement vu. Les figures 11 et 12 montrent une bonne soudure et une soudure à froid respectivement dans un tube soudé EF de 450 mm. La différence mesurée de la distance de l'indication HAZ par rapport aux fils est illustrée. On peut également voir sur la figure 12 qu'il existe des zones de manque de fusion associées à l'interface.

Un résumé des dimensions des raccords de tuyaux EF et des types de défauts inspectés à ce jour est présenté au tableau 1.

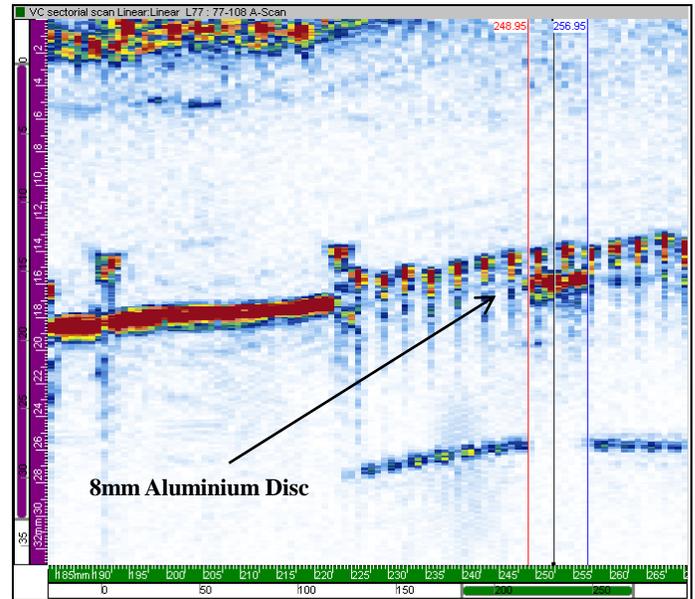


FIG. 9 IMAGE DE JOINT EF D'UN TUYAU 180MM AVEC UN DISQUE D'ALUMINIUM DE 8MM

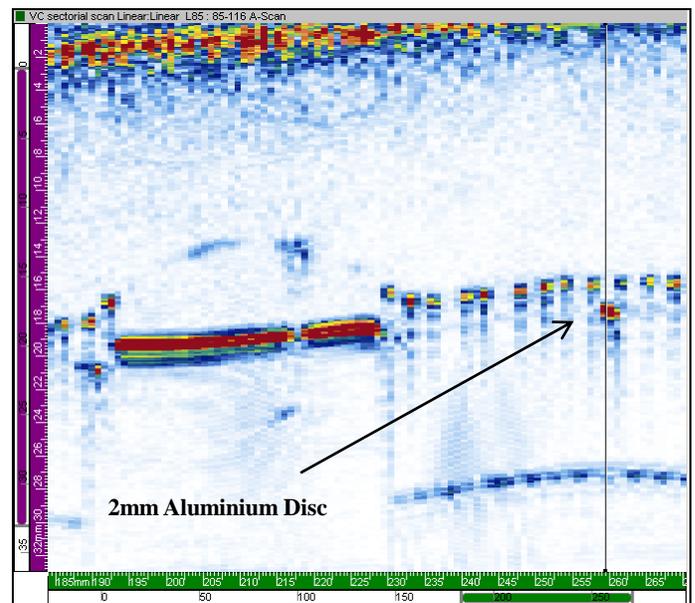


FIG. 10 IMAGE DE JOINT EF D'UN TUYAU 180MM AVEC UN DISQUE D'ALUMINIUM DE 2MM

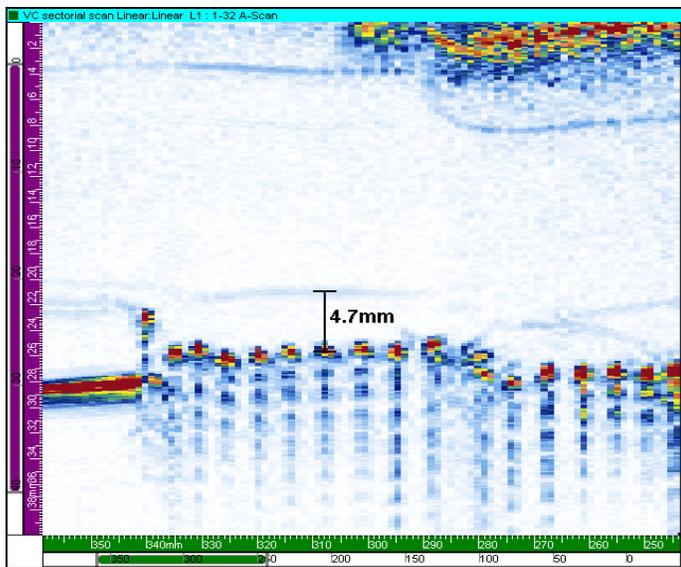


FIG. 11 IMAGE DE JOINT EF D'UN TUYAU 450MM AVEC UNE BONNE FUSION

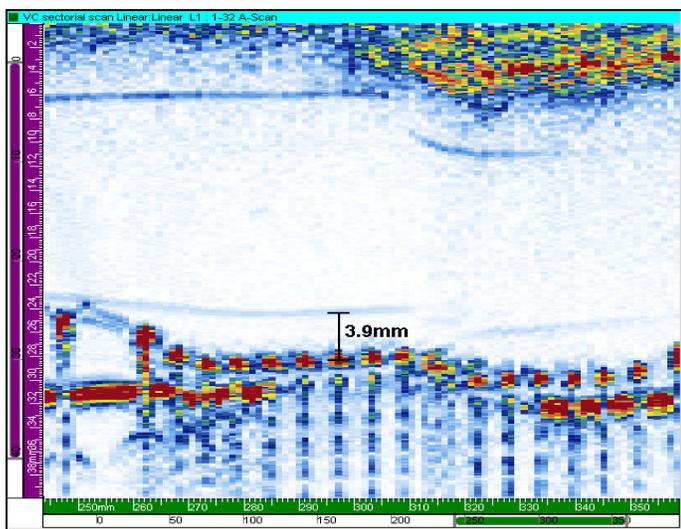


FIG. 12 IMAGE DE JOINT EF D'UN TUYAU 450MM AVEC UNE FUSION FROIDE

TABLEAU 1 RÉSUMÉ DES TAILLES DES JOINTS DE TUYAUX EF

	Plans	Part fine	Part. grossière	Soudure froide	Sous-pénétr.
180	X			X	X
225	X			X	X
355	X			X	X
450	X			X	X
710					

L'inspection des joints BF nécessite l'utilisation d'ultrasons d'angle et une combinaison de quatre techniques différentes a été utilisée pour obtenir une couverture complète de la zone de soudure: tandem, balayage angulaire, onde rampante et diffraction de temps de vol (TOFD) (Figure 13).

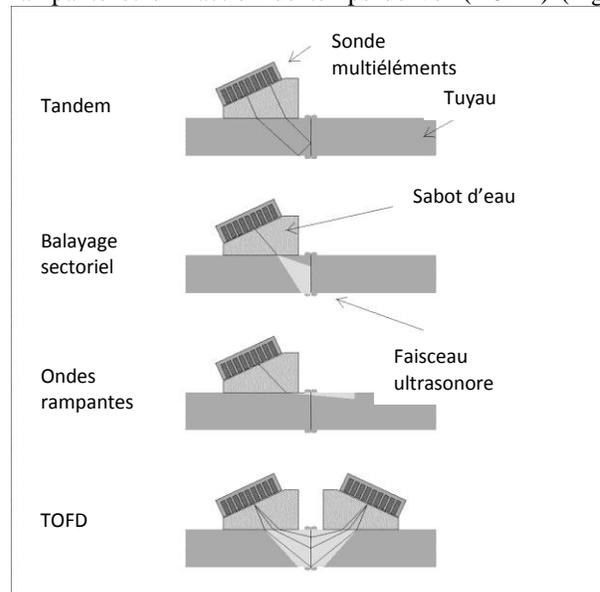


FIG. 13 TECHNIQUES D'INSPECTION UTILISÉES POUR INSPECTER LES SOUDURES BF

En utilisant trois des quatre techniques développées dans le projet [10] et illustrées à la figure 13, une gamme de tuyaux BF ont été inspectés, ce qui a donné des résultats encourageants. La technique qui n'a pas encore été utilisée est la technique TOFD.

Les techniques sont, dans la plupart des cas, complémentaires. La technique tandem utilise la moitié des éléments du réseau en phase pour la transmission et l'autre moitié pour la réception. La technique est bonne pour détecter les défauts planaires, mais la couverture est limitée à une zone plus proche de la surface interne.

La technique balayage angulaire utilise tous les éléments du réseau pour créer une ouverture, balayant le faisceau sur une plage d'angles. La technique donne une vue d'ensemble de la soudure et couvre la majeure partie de la zone de fusion à l'exception de quelques millimètres près de la surface extérieure.

La technique de l'onde rampante ne couvre que la région proche de la surface externe de la soudure, qui est la partie de la soudure non couverte par les deux premières techniques. La configuration pour la technique d'ondes rampantes utilise un balayage sectoriel à angle élevé, produisant des ondes de compression se propageant immédiatement sous la surface d'inspection, pour détecter les défauts de surface et de surface proche.

La technique TOFD couvre toute la zone de fusion et utilise la diffraction directe pour détecter les défauts verticaux. La

configuration qui sera utilisée dans ce projet est une technique de pitch-catch utilisant deux balayages de secteur, où les deux sondes utilisent une grande ouverture pour transmettre et recevoir des faisceaux couvrant toute la soudure.

Encore une fois, des sabots d'eau à face ouverte ont été utilisés. L'angle des sabots a été optimisé pour minimiser la direction électronique par les éléments de la sonde (Figure 14). Cette figure montre deux sondes BF dans la configuration TOFD. Pour les trois autres techniques, une seule sonde est requise.

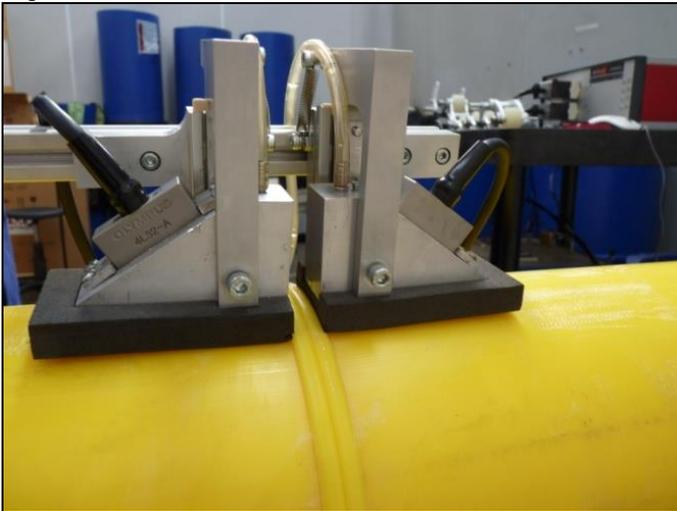


FIG. 14 SABOTS D'EAU ANGULAIRE UTILISÉS POUR INSPECTER LES SOUDURES BF

La technique la plus prometteuse lors de l'inspection des joints BF est la technique de balayage angulaire. Les figures 15, 16 et 17 montrent une série d'images de joints BF soudés dans des tuyaux en PE de 355 mm. La figure 15 montre une bonne articulation sans défauts discernables. La figure 16 montre un joint avec un disque d'aluminium de 8 mm et la figure 17 montre un joint avec un disque d'aluminium de 4 mm démontrant qu'un défaut de fusion d'au moins 4 mm de diamètre est facilement détectable. Les balayages sectoriels montrent également certaines zones non désirées avec un niveau de bruit élevé. Ce sont des signaux internes provenant du sabot d'eau et d'autres travaux sont en cours pour éliminer ces signaux. La figure 18 montre les balayages B fusionnés d'un balayage angulaire et d'un balayage tandem dans un tube de 355 mm contenant des disques en aluminium.

Un résumé des dimensions des raccords de tuyauterie BF et des types de défauts inspectés à ce jour est présenté au tableau 2.

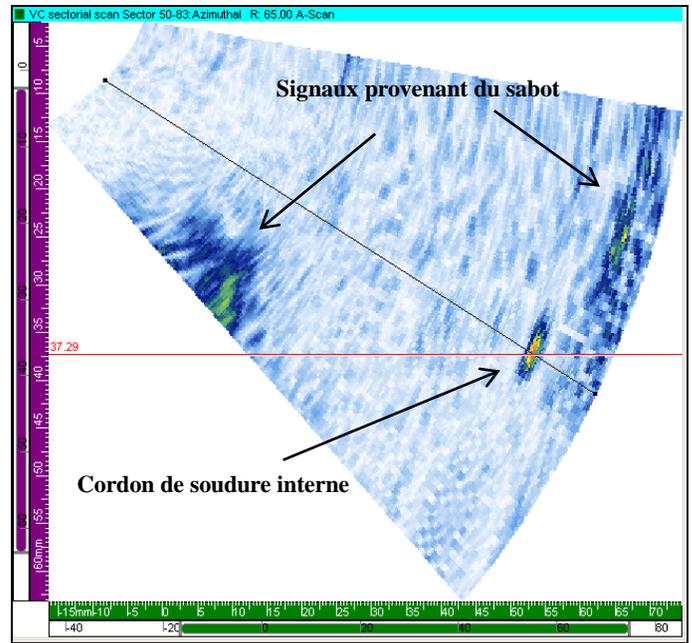


FIG. 15 IMAGE D'UN JOINT BF DANS UN TUYAU PE DE 355MM SANS DÉFAUT

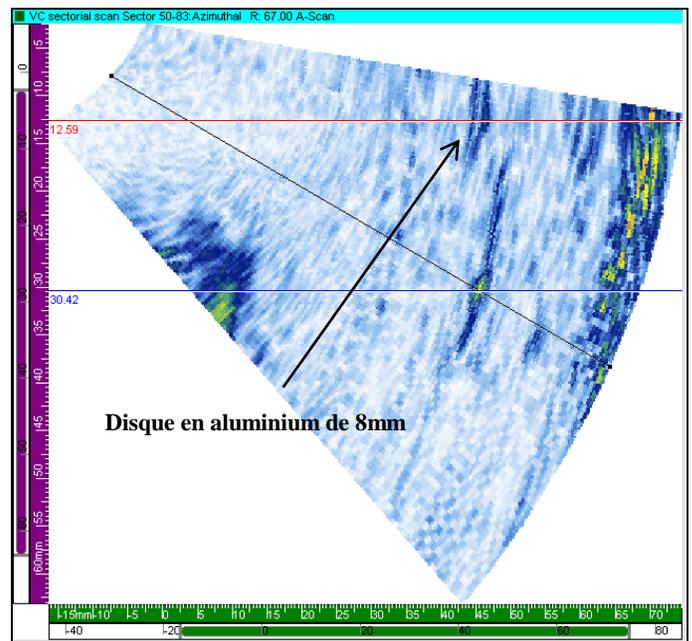


FIG. 16 IMAGE D'UNE JOINT BF EN TUYAU PE 355MM AVEC UN DISQUE EN ALUMINIUM DE 8MM

TABLEAU 2 RÉSUMÉ DES TAILLES DES JOINTS DE TUYAUTERIE BF / TYPES DE DÉFAUTS INSPECTÉS

	Plans	Part. fines	Part. grossières	Soudure froide
180		X		
225		X		
355	X	X		
450				
710	X	X		

Le développement du logiciel de reconnaissance automatique des défauts (ADR) pour l'inspection des soudures EF a bien progressé. Il y a trois étapes principales dans l'algorithme:

- Détection des zones correspondant aux fils chauffants (Figure 19)
- Détermination de la ligne de fils (Figure 20)
- Détermination de la carte des défauts (Figure 21)

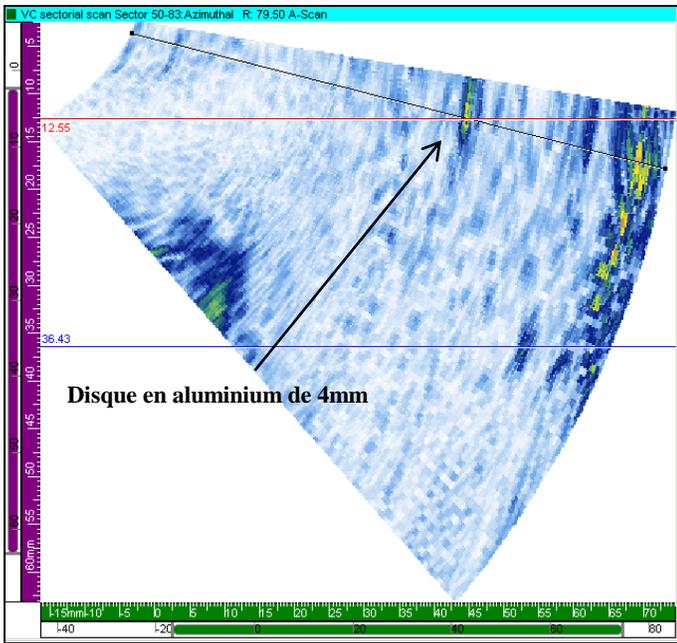


FIG. 17 IMAGE D'UN JOINT BF EN TUYAU PE 355MM AVEC DISQUE EN ALUMINIUM DE 4MM

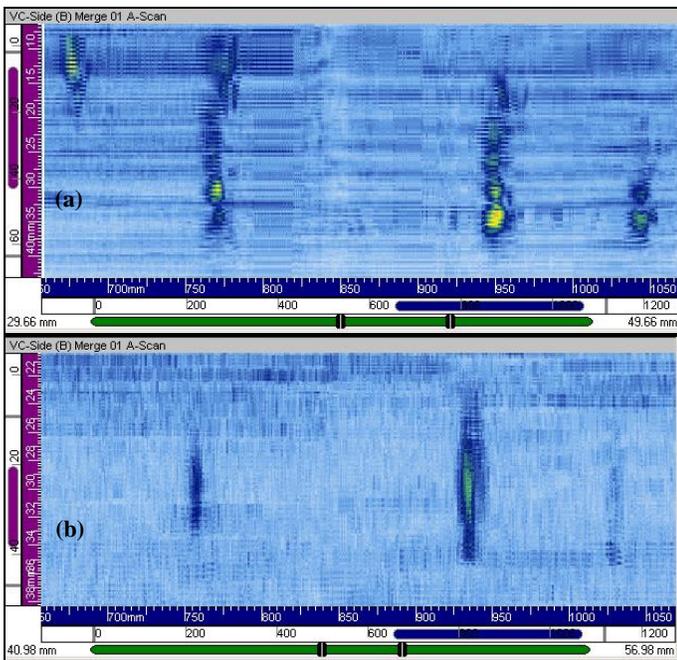


FIG. 18 PROJECTION B-SCAN UTILISANT (a) BALAYAGE ANGULAIRE (b) TANDEM

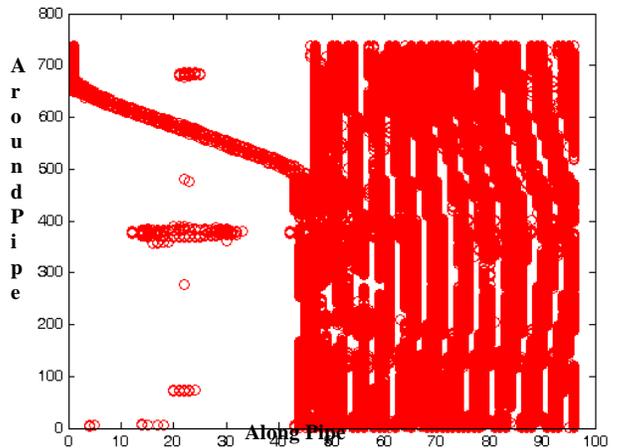


FIG. 19 DETECTION DES ZONES CORRESPONDANT AUX FILS DE CHAUFFAGE

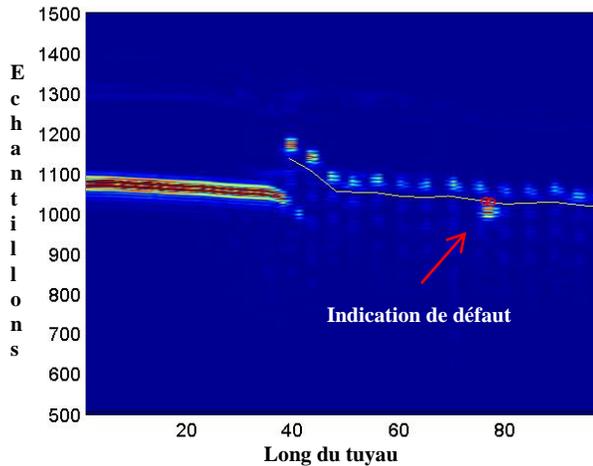


FIG. 20 DÉTERMINATION DE LA LIGNE DE FILS

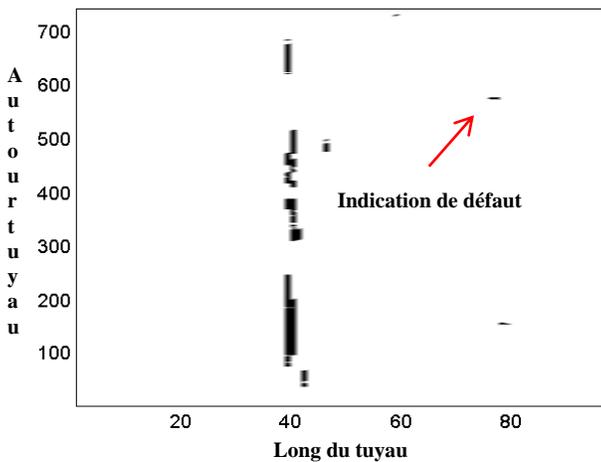


FIG. 21 DETERMINATION DE LA CARTOGRAPHIE DES DEFAUTS

ELABORATION DES CRITERES D'ACCEPTATION

Les soudures qui ont été inspectées dans le cadre du projet sont soumises à des essais mécaniques à l'aide d'essais à court terme et à long terme. Les résultats de ces essais seront analysés pour chacun des différents types de défauts et comparés aux résultats des essais sur les soudures ne présentant pas de défauts délibérés. Les niveaux de contamination particulière réels seront déterminés en utilisant des techniques d'analyse de surface sur les interfaces de soudage. Des graphiques de la taille des défauts / niveau de contamination particulière par rapport aux performances mécaniques seront générés afin de calculer les tailles / niveaux critiques de défauts qui réduisent l'intégrité de la soudure, pour chaque matériau de tuyau, taille de tuyau et type de joint [10].

Les essais mécaniques qui seront utilisés pour évaluer l'intégrité des joints soudés sont:

- Soudures BF :
 - Essais de traction selon EN 12814-7 [12]

- Essai de rupture de fluage de pièce selon EN 12814-3 [13]
- Essai de rupture de fluage par traction du tuyau entier [14]
- Soudures EF:
 - Essai de décohésion selon EN 12814-4 [15]
 - Essai de décohésion par écrasement ISO 13955 [16]
 - Essai de rupture de fluage pour les joints de douille Annex C of EN 12814-3
 - Essais de pression hydrostatique à 80°C comme spécifié par BS EN 12201-3 [17]
 - Essai de rupture de fluage par traction du tuyau entier

La figure 22 montre un échantillon d'essai de traction provenant d'un joint BF et la figure 23 montre la surface de rupture d'éprouvettes d'essai de traction à partir d'un tube PE de 225 mm; le joint de tuyau sans défaut est une rupture entièrement ductile (figure 23a), alors que le joint de tuyau avec une forte contamination au talc est une rupture complètement cassante (figure 23b).

La figure 24 montre les surfaces de rupture des échantillons d'essai de décohésion de la peau à partir des joints EF dans un tuyau de 225 mm. La figure 24a montre la surface de fracture d'un joint ne contenant aucun défaut et montre une fracture ductile à travers le plan des fils chauffants. La figure 24b montre la surface de rupture d'un joint contenant une soudure froide et montre une rupture fragile à travers l'interface de soudure.

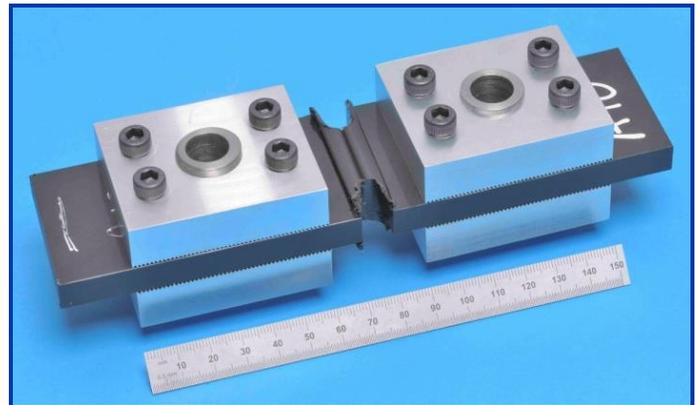


FIG. 22 ESSAI DE TRACTION D'UN JOINT.

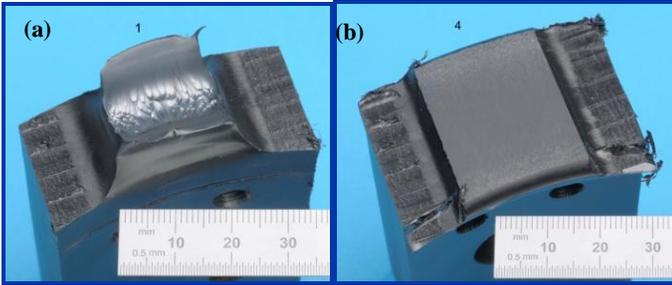


FIG. 23 SURFACE DE FRACTURE DES ÉCHANTILLONS D'ESSAI DE TENSION À PARTIR DE TUYAUX DE PE DE 225 MM AVEC (A) UNE DÉFAILLANCE TOTALEMENT DUCTILE ET (B) UNE DÉFAILLANCE ENTIÈREMENT CASSANTE.

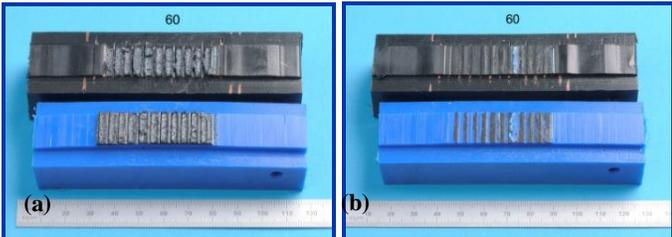


FIG. 24 SURFACES DE FRACTURE D'ÉCHANTILLONS DE TEST DE DECOHESION DE PEEL A PARTIR DE JOINTS EF DANS UN TUYAU DE 225MM A FRACTURE DUCTILE A TRAVERS LE PLAN DES FILS DE CHAUFFAGE ET (B) FRACTURE DE PETITS FRAGMENTS A TRAVERS L'INTERFACE DE SOUDAGE.

DEVELOPPEMENT DE L'INSTRUMENT END

Un nouveau détecteur de défauts par ultrason multiélément compacte capable de fonctionner dans un environnement hostile a été conçu (Figure 25). Des systèmes d'acquisition et d'analyse de données END par ultrasons multiéléments sont également en cours de développement dans ce projet. Une conception étendue de l'électronique de contrôle du faisceau ultrasonore et le traitement des données dans l'instrument est en cours. En temps voulu, la mise en œuvre dans l'instrument des algorithmes ADR sera entreprise.



FIG. 25 REPRESENTATION DE L'INSTRUMENT NDE TESTPEP

L'instrument, représenté sur la figure 25, présente les caractéristiques suivantes:

- Cartes UT et PC intégrées
- Accès à distance au logiciel (Ethernet ou Wifi)
- 64 x 64 canaux multiéléments
- 4 voies conventionnelles
- Boîtier compact avec protection IP67 pour une immersion totale (<0.5m).
- Mémoire SSD pour le stockage des données (100GB).
- 2 batteries amovibles permettant jusqu'à 4h de fonctionnement continu
- Poids: 5kg.
- Taille: 320 x 240 x 100mm.

DEVELOPPEMENT DU SCANNER

Un système de scanner flexible a été conçu et fabriqué pour permettre une rotation complète de 360 ° autour des joints BF et EF dans les tuyaux de 90 mm à 1000 mm (Figure 26). Il comprend une plaque principale maintenue en position autour du tuyau par plusieurs maillons et un mécanisme de réglage. La plaque contient un codeur ainsi que le support des porte-sondes pour les joints BF et EF.

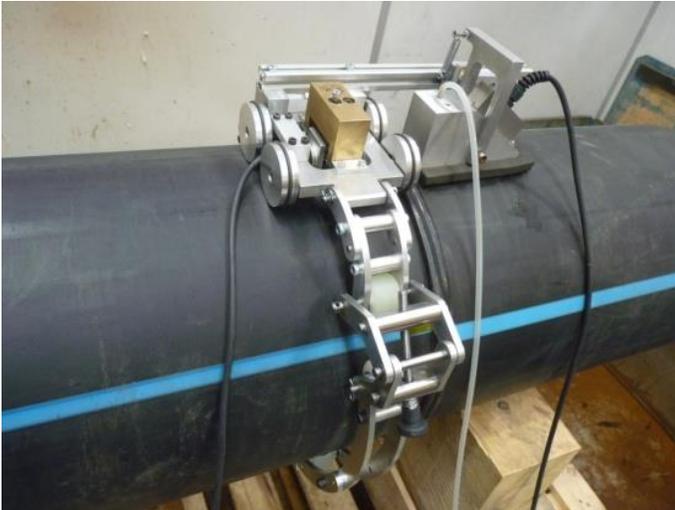


FIG. 26 SCANNER A CHAÎNES LIEES FLEXIBLE AVEC PORTE-SONDE POUR INSPECTION BF

ASSEMBLAGE ET ÉVALUATION DU SYSTÈME PROTOTYPE COMPLET

Le système NDE complet, y compris les instruments, les sondes et le système de balayage a été assemblé et testé afin d'évaluer la sensibilité, la reproductibilité et la facilité d'utilisation du système. Un essai a été entrepris sur un certain nombre de joints EF qui avaient été découpés dans le tuyau et le système de scanner n'a donc pas pu être utilisé. Cependant, en manipulant manuellement la sonde (Figure 27), les joints ont été inspectés avec succès et un résultat typique, montrant un vide autour de l'un des fils, est montré dans la Figure 28. Dans un autre essai, une petite sélection de joints destinés au Royaume-Uni l'industrie de la production d'énergie a été examinée par ce système en parallèle avec un autre système PAUT développé par l'industrie. Une seule petite indication a été détectée dans une articulation, par les deux systèmes (Figure 29). Cette articulation est en cours d'investigation pour déterminer la cause de l'indication. D'autres essais sur le terrain sont prévus sur de nouvelles installations de pipelines utilitaires au Pays de Galles et dans les Midlands anglais.



FIG. 27 MANIPULATION MANUELLE DE LA SONDE POUR INSPECTER L'ÉCHANTILLON DU JOINT EF

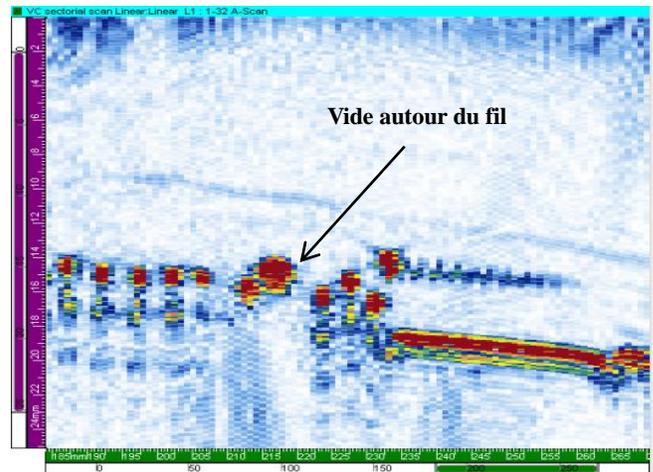


FIG. 28 RESULTAT POUR LES ESSAIS MANUELS

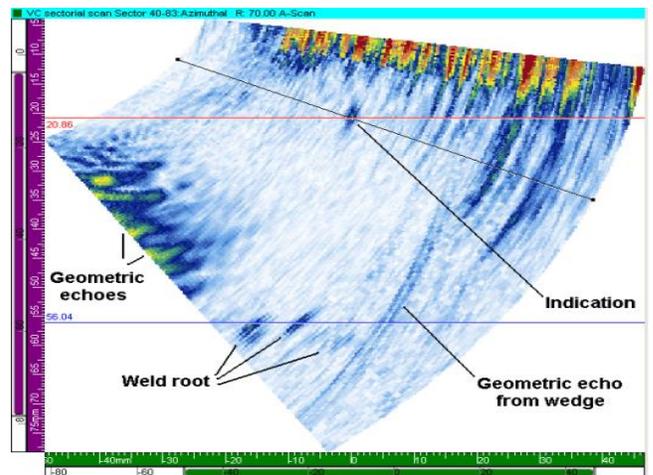


FIG. 29 PETITE INDICATION DANS UNE SOUDURE UTILISEE DANS L'ENERGIE

TRAVAIL RESTANT

Un résumé du travail restant dans ce projet est donné ci-dessous :

- Finaliser la fabrication des soudures BF et EF contenant des défauts créés
- Terminer l'inspection des soudures contenant des défauts créés afin de déterminer les limites de détection pour la gamme de tailles de tuyaux étudiées.
- Terminer les essais mécaniques des soudures contenant des défauts délibérés afin de déterminer les tailles de défauts critiques et les niveaux de contamination.
- Fabriquer le nouvel instrument END
- Finaliser le développement du logiciel de détection et d'analyse des défauts
- Continuer d'évaluer le prototype complet du système d'END et effectuer des essais sur le terrain.

REMERCIEMENTS

La recherche menant à ces résultats a été financée par le septième programme-cadre de l'Union européenne géré par REA-Research Executive Agency [PF7 / 2007-2013] en vertu de la convention de subvention n° [243791-2].

Le consortium du projet est composé de la Fédération Européenne de Soudage, Assemblage et Coupe (EWF), l'association espagnole de contrôle non destructif (AEND), le groupe de montage en surface et technologies apparentées (SMART Group), Pipeline Industries Guild, l'association italienne de contrôle non destructif (AIPnD), Vermon, M2M, Plasflow, Ingénierie Isotest, E.ON Ruhrgas, British Energy, Hessel Ingenieurtechnik, Université de Technologie de Kaunas, Consorzio Catania Ricerche et TWI.

Les informations contenues dans ce document sont fournies telles quelles et aucune garantie ou garantie ne garantit que les informations sont adaptées à un usage particulier. L'utilisateur de celui-ci utilise les informations à ses seuls risques et responsabilités.

REFERENCES

1. ASME, 2008, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-755*, American Society of Mechanical Engineers, New York.
2. Munns, I.J., and Georgiou, G.A., 1999, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", *Insight*, 41(5), British Institute of Non-Destructive Testing, Northampton, UK.
3. Troughton, M.J., 2001, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", *Plastics Pipes XI Conference*, Institute of Materials, London.
4. Messer, B., Yarmuch, M., and den Boer, P., 2003, "Novel high resolution defect detection for thermoplastic butt welds", *Pipeline and Gas Journal*, March, Oildom Publishing Company of Texas, Houston.
5. Crawford, S.L., Doctor, S.R., Cinson, A.D., Cumblidge, S.E., and Anderson, M.T., 2009, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", PVP2009-77958, *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME, New York.
6. Frederick, C., Porter, A., and Zimmerman, D., 2009, "High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array", PVP2009-77783, *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME, New York.

7. Shin, H.J., Jang, Y.H., Kwon, J.R., and Lee, E.J., 2004, "Nondestructive testing of fusion joints of polyethylene piping by real time ultrasonic imaging", *Plastics Pipes XII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.
8. Bird, C., Caravaca, D., and Raude, A., 2006, "The inspection of cold welds in electrofusion joints", *Plastics Pipes XIII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.
9. Caravaca, D.S., Bird, C., and Kleiner, D., 2007, "Ultrasonic phased array inspection of electrofusion joints in polyethylene pipes", *Insight*, 49(2), British Institute of Non-Destructive Testing, Northampton, UK.
10. Troughton, M., Spicer, M., and Hagglund, F., 2012, "Development of Ultrasonic Phased Array Inspection of Polyethylene Pipe Joints", PVP2012-78860, *ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Conference*, ASME, Toronto.
11. Mazeika, L., Sliteris, R., and Vladisaukas, A., 2010, "Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples", *Ultragarsas*, 65(4), Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.
12. BS EN 12814-7, 2002, "Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products – Part 7: Tensile test with a waisted test specimen", British Standards Institution, London, UK.
13. BS EN 12814-3, 2000, "Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products – Part 3: Tensile creep test", British Standards Institution, London, UK.
14. Brown, C.I., and Troughton, M.J., 2004, "Qualifying longterm performance of butt fusion welds in PE pipes from short-term tests", *Plastics Pipes XII Conference*, Plastics Pipes Conferences Association.
15. BS EN 12814-4, 2001, "Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products – Part 4: Peel test", British Standards Institution, London, UK.
16. ISO 13955, 1997, "Plastics pipe and fittings – Crushing decohesion test for polyethylene (PE) electrofusion assemblies, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
17. BS EN 12201-3, 2003, "Plastics piping systems for water supply – Polyethylene (PE) – Part 3: Fittings", British Standards Institution, London, UK.