

פיתוח והערכה של מערכת בדיקת מערך מופע האולטראסוני לריתוכי צנרת פוליאתילן

## DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF A PHASED ARRAY ULTRASONIC INSPECTION SYSTEM FOR POLYETHYLENE PIPE JOINTS

Mike Troughton, Malcolm Spicer and Fredrik Hagglund, TWI Ltd, Cambridge, UK

### תקציר

במאמר זה מוצג הפיתוח של המערכת האולטרסונית הייחודית לבדיקת הריתוך פנים (BF) והאלקטרופיוז'ן (EF) בצינורות פוליאתילן (PE) בקטרים של עד 1000 מ"מ, וכן פיתוח שיטות הבדיקה, הנהלים והציוד. כמו כן, מוצגים הניסויים שנערכו על מנת לבחון מערכת בדיקה של האב טיפוס הן בשטח והן במעבדה.

מאמר זה מציג פרויקט מחקר במימון אירופאי, הנקרא TestPEP, אשר כוללת כ-17 ארגונים משבע מדינות, בתכנון, ייצור ואישורים למערכת בדיקה במערך מופע אולטראסונית (PAUT) לבדיקת ריתוכי פנים (BF) ואלקטרופיוז'ן (EF) לצינורות PE בסביבה סלעית וקשה.

### מבוא

השיטה הנוכחית באירופה להבטחת איכות הריתוכים ב-BF ו-EF בצינורות PE במהלך ההתקנה הוא על ידי רישום הפרמטרים שהשתמשו בהם בריתוך, יחד עם בדיקה וויזואלית באזור הריתוך ובדיקת לחץ הידרוסטטי לטווח קצר, בתוספת בדיקת הרס לדוגמאות שנחתכו מהריתוכים על בסיס מדגם לטווח קצר. עם זאת, בדיקה וויזואלית יכולה לבחון רק את פני השטח החיצוני של הריתוך; אך לא יכולה לזהות פגם פנימי או ריתוך קר (ריתוך לא שלם או חלקי שנגרם על ידי חדירה של שרשרת מולקולארית לקויה שמתגבשת יחד בממשק הריתוך, וכתוצאה מכך נוצר כשל פריך בבדיקה מכאנית לטווח קצר). כמו כן, עבודה קודמת ב-TWI [1,2], הראתה שבדיקת לחץ הידרוסטטית תגרום לכשל רק כאשר מחברי BF ו-EF מכילים פגמים גסים. וכן, אם קיים פגם בריתוך ישנו סיכוי קטן בלבד שייכלל בדגימה שנחתכה במדגם לבדיקה המכנית לטווח קצר. לבסוף, לאחר בדיקה מכנית של חיבור, מחליפים אותו עם אחד אחר אשר לא ידוע טיב הריתוך דבר שאינו מבטיח את שלמות מערכת הצינורות.

בדיקת אל-הרס נפחית (NDE) יכולה לספק ניתוח מלא של הריתוך מבלי להרוס ריתוכים טובים. לכן זוהי השיטה היחידה שיש לה את היכולת להבטיח את שלמות הריתוכים במערכת צינורות PE. עם זאת, כדי לעשות זאת, שיטת ה-NDE חייבת להיות בעלת הוכחות שביכולתה לזהות את כול הסוגים האפשריים של הפגמים שיכולים לפגוע בשלמות הריתוך.

בשנים האחרונות, נחשבה PAUT מערכת להערכת תקינותם של ריתוכי BF [3-7] ו-EF [8-10]. עם זאת, שיטה זו מוגבלת לטווח מצומצם של מידות צינורות ו/או לא כללו קריטריוני קבלה של הפגמים.

### שיטות הבדיקה

בריתוכי פנים ואלקטרופיוז'ן דרושות שיטות שונות של בדיקות. בריתוך פנים הממשק ניצב לפני שטח הצינור ולכן דרוש שימוש של אלומה אולטראסונית משופעת בכדי לזהות פגמים שיתכנו להימצא בממשק. על מנת לקבל כיסוי מלא בעובי הדפנות באזור הריתוך, שומשו ארבע שיטות שונות (איור 1): טנדום, הד-

דופק סקטוריאלי, גל זחילה ו-TOFD  
(tandem, Sector pulse-echo, creeping wave, time-of-flight diffraction TOFD)

שיטת הטנדם (tandem) משתמשת בחצי מרכיבי גששי המערך לשידור ובחצי השני לקבלה. השיטה טובה לאיתור פגמים מישוריים על פני השטח; עם זאת, הכיסוי מוגבל בערך בשטח שבין אמצע עובי הדופן לבין פני השטח הפנימיים.

שיטת הד-דופק סקטוריאלי (Sector pulse-echo) משתמשת בכול הרכיבים במערך כדי ליצור צמצם שאוסף את האלומה על פני טווח זוויות. שיטה זו נותנת סקירה כללית על הריתוך ומכסה את רוב האזור למעט לכמה מילימטרים הקרובים לפני שטח החיצוני של הצינור.

שיטת הגל זחילה (creeping wave) מכסה רק את האזור הקרוב לפני שטח החיצוני של הצינור, שהוא החלק הלא מכוסה על ידי שתי השיטות הראשונות. שיטה זו מייצרת גלים דחוסים בעלי זווית גבוהה, המתפשטים מיד מתחת לפני שטח הבדיקה, בכדי לזהות פגמים בפני השטח.

שיטת ה-TOFD (time-of-flight diffraction), מכסה את אזור הריתוך כולו ומשתמשת בעקיפה קדימה כדי לזהות פגמים אנכיים. תצורת ה-TOFD משתמשת בשיטת pitch-catch באמצעות שני סורקים (אחד בכול צד), כאשר שני המתמרים משתמשים בצמצם גדול בכדי להעביר ולקבל אלומות את המחבר כולו.

במחברי EF, ממשק הריתוך מקביל לפני שטח הצינור, ולכן ניתן להשתמש בסריקה ליניארית רגילה ( $0^\circ$ ), כשהאולטרסאונד ממוקד בממשק שבין הצינור למצמד ה-EF (איור 2). כיוון שסליל החימום ממוקם מעל ממשק הריתוך, נדרשת רזולוציה מספקת בכדי לראות את החוט כמו גם הלפיפה של החוט.

### ציוד הבדיקה

מערכת הבדיקה של PAUT מורכבת ממספר רכיבים: מערך גששים, המייצרים את אות האולטרסאונד ומזהים את האותות המוחזרים מהפגמים במחבר; גשש טריז, שמבטיח כי האולטרסאונד מועבר מהגשש אל תוך צינור הפוליאתילן או המחבר בזווית הנכונה ובאופן אנרגיה מינימלי; מחזיק הגשש, אשר מבטיח מגע מתאים בין גשש הטריז לצינור/מצמד סביב ההיקף כולו; סורק, הנושא את מכלול הגשש סביב מחברי הצינורות ללא תזוזה צרית ומתעד את מיקומו ההיקפי; וגלאי הפגמים, אשר שולח אותות חשמליים לרכיבי הגשש ומנתח את האותות שחוזרים.

בפרויקט זה, התכנון של כול אחד מהרכיבים הותאם במיוחד לבדיקת צינורות PE. המפרט של הגששים לבדיקת ריתוכי BF, מבחינת ממדים פיזיים, תדר האולטרסאונד, מספר האלמנטים וגובה הקול, פותח על סמך היכולת לזהות חורים שטוחים וחריצים בגדלים שונים, עבור קטרים ועובי דופן שונים, ומפרט הגששים לבדיקת מחברי ה-EF- פותח על בסיס היכולת לזהות את חוטי החימום במצמדי EF שלא רותנו במידות שונות. נמצא כי בטווח הקטרים שבין 110 ל-1000 מ"מ, ניתן לבצע בדיקה רק באמצעות ארבע גששים שונים (שניים עבור BF ושניים עבור EF). גששי ה-PAUT תוכננו ויוצרו על פי המפרט לעיל.

על מנת להבטיח התאמה אקוסטית טובה עם המשטח הלא סדיר של מצמדי ה-EF- ולאפשר ניתוב של האלומות בזווית לבדיקת ה-BF, גשש טריז חייב להיות טריז מים, שמצויד בבד איטום גמיש כדי לשמור את המים בטריז בזמן שעובר על הצינור או על מצמד ה-EF. זווית הטריזים בבדיקת ריתוכי ה-BF הותאמה כדי למזער את הניתוב האלקטרוני על ידי האלמנטים של הגשש. תצלומים של מכלולי טריז/גשש מוצגים באיורים 3 ו-4.

מרכב מחזיקי הגשש תוכנן בהתאמה למכלול הגששים/טריזים השונים על אותה מערכת סריקה. הסורק מורכב על קרון, שמכיל מקודד כדי לתעד את המיקום המדויק בהיקף מסביב למחבר וכתומך למחזיקי

הגשש, וסדרה של חוליות שרשרת להחזיק את הקרון סביב הצינור (איורים 5 ו-6).

כחלק מפרויקט TestPEP, תוכן ויוצר גלאי פגמים חדש לחלוטין, עם היכולת לפעול בסביבות קשות (איור 7) עם התכונות הבאות:

- לוח מחשב משולב עם חומרה אולטראסונית.
- גישה מרחוק ליישום תוכנה (WiFi או Ethernet).
- הגנת מלאה נגד מים IP67.
- זיכרון פנימי של 100GB לאחסון נתונים.
- שני סוללות נטענות המאפשרות שימוש מתמשך עד שש שעות ברצף

### אימות תהליך בדיקה

תהליך הבדיקה נבדק על ידי בדיקת ריתוכי BF- EF בקטרים של עד 710 מ"מ, המכילים בכוונה פגמים ידועים, כולל זיהום חלקיקים, ריתוך קר ופגמים בפני שטח (25µm (1 mil) עובי, ובקוטר של 1-50 מ"מ). מחברים אלו הוכנו במעבדה על ידי מרתכים מוסמכים, תוך שימוש בצינורות ומחברים שבמלאי. בהתאם לתהליך ריתוך DVS 1-2207.

איורים 8 ו-9 מראים תמונות אולטראסונית של פגמים בצינור 225 מ"מ דרג 16 בריתוך EF המכיל פגם בפני שטח בקוטר 2 מ"מ והצינור לא הושחל במלואו לתוך המצמד, בהתאמה. ניתן לראות את שני סוגי הפגמים בבירור. איורים 10 ו-11 מציגים תמונות ממחברי EF בצינור 450 מ"מ דרג 10, ריתוך EF סטנדרטי, וריתוך EF שבו זמן החימום קוצר ב-50% מהמלצות היצרן, בהתאמה. האינדיקציה מעל חוטי החימום מראה את הגבול של האזור שהותך בתוך מצמד ה-EF [9]. המרחק בין אינדיקציית אזור ההיתוך ואינדיקציית חוטי החימום יכול לשמש לפיכך בכדי לזהות ריתוכים קרים [9,11,12].

איור 12 מציג תמונה של הד-דופק סקטוריאלי מצינור 355 מ"מ דרג 16 PE100 מחבר BF המכיל פגם בפני שטח ממשק הריתוך בגודל 4 מ"מ.

פותרו תהליכים המאפשרים לזהות באופן עקבי את הפגמים, בשני סוגי הריתוך BF ו-EF:

- פגמים בפני שטח / חוסר ריתוך (קוטר גדול מ-1 מ"מ).
- חלקיקים עדינים (פחות מ-22 µm)
- חלקיקים גסים (150-300 µm)
- ריתוכים קרים
- חללים (קוטר יותר מ-1 מ"מ)
- השחלת צינור באופן מלא במצמדי EF.

### הערכת מערכת אב טיפוס

E.ON Ruhrgas, גרמניה, ייצרו תשעה מצמדי EF 110 מ"מ דרג 16 רב שכבתיים, HexelOne® PE100 צינורות מונוקומפוזיטים, שחלקם הכילו פגמים וחלקם לא. המצמדים נבדקו במעבדה וכול תשעת המצמדים הוערכו כראוי. לדוגמה, איור 13 מראה תמונה אולטראסונית של מצמד שבה הבדיקה הראתה

שהיא מכילה זיהום חלקיקי, E.ON Ruhrgas אישר כי חול הוכנס לממשק. ניתן לראות בתמונה גם אינדיקציה מתוך הדופן של הצינור, מה שמרמז כי ההדבקה בין שכבות צינור הפוליאתילן איננה מושלמת.

בצפון ווילס, בריטניה, בוצעו ניסויי שדה, שם נבדקו מצמדי EF בצינור 710 מ"מ PE100 שהותקנו בתחנת כוח הידרו-חשמלית (איור 14).

בנוסף, ריתוכי ה-BF- בצינור גז 355 מ"מ דרג 8 PE80 ומחברי EF בצינור גז 250 מ"מ דרג 16 PE80 נבדקו בתעלה בשפילד, בריטניה. בשני מערכת האב טיפוס פעלה בצורה מושלמת ולא אותרו פגמים.

## מסקנות

שיטות בדיקת המערך האולטראסוני והנהלים פותחו כדי לאתר את כל סוגי הפגמים העיקריים שיכולים להתרחש בריתוכי BF ו-EF בצינורת פוליאתילן (חוסר ריתוך, זיהום חלקיקים, ריתוך קר, השחלה לא טובה ב-EF, חללים באזור הריתוך, וסטייה צרית בין הצינורות) ומערכת אב הטיפוס תוכננה ויוצרה במיוחד עבור בדיקות ריתוך בצנרת PE בקטרים שבין 110 ל-1000 מ"מ ועובי דופן בין 10 ל-60 מ"מ. מערכת זו נבדקה והוערכה במעבדה ובשטח, והתוצאות שהתקבלו מצוינות בבדיקת מחברים המכילים פגמים אמתיים ומלאכותיים.

## תודות

המחקר שהוביל לתוצאות אלו קיבל מימון מתוכנית המסגרת השביעית של האיחוד האירופאי המנוהלת על ידי [PF Research Executive Agency-2013-2007/7] במסגרת הסכם מענק מס' 243791-2.

המידע במסמך זה מסופק כפי שהוא, ואין כל אחריות על כך שהמידע מתאים לכול מטרה מסוימת. המשתמש במידע על אחריותו בלבד.

## מקורות

1. C.I. Brown and M.J. Troughton, *Plastics Pipes XII Conference* (2004).
2. M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).
3. I.J. Munns and G.A. Georgiou, *Insight*, **41(5)**, 291 (1999).
4. M.J. Troughton, *Plastics Pipes XI Conference* (2001).
5. B Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, *Pipeline and Gas Journal*, March (2003).
6. S.L. Crawford, S.R. Doctor and A.D. Cinson, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2009-77958 (2009).
7. C. Frederick, A. Porter and D. Zimmerman, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2009-77783 (2009).
8. H.J. Shin, Y.H. Jang, J.R. Kwon and E.J. Lee, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).
9. C. Bird, D. Caravaca and A. Raude, *Plastics Pipes XIII Conference* (2006).

- D.S. Caravaca, C. Bird and D. Kleiner, *Insight*, **49(2)**, 83 (2007). 10.
- M. Troughton, M Spicer and F Hagglund, *ASME Pressure Vessels and Piping* 11.  
*Division Conference*, PVP2012-78860 (2012).
- J Shi, J Zheng, W Guo and C Xu, *ASME Pressure Vessels and Piping Division* 12.  
*Conference*, PVP2012-78655 (2012).