

בדיקה נפחית של ריתוכי פנים ואלקטרופיז'ן בצינורות פוליאתילן באתר העבודה

On-site Volumetric Inspection of Butt Fusion and Electrofusion Joints in Polyethylene Pipes

Dr. Mike Troughton and Dr. Fredrik Hagglund, TWI Ltd, UK

תקציר

רוב הפגמים שיכולים להיווצר בעקבות ריתוך צינורות פוליאתילן בשטח, כגון אבק, שמנים, לכלוך, טביעות אצבע או ריתוכים קרים אינם ניתנים לזיהוי על ידי הסתכלות לאחר הריתוך. כדי לזהות סוגי פגמים כאלה, נדרש שיטת בדיקה נפחית.

מאמר זה מתאר מערכת בדיקת מערך אולטראסוני חדשה והתהליכים הקשורים אשר פותחו במיוחד עבור בדיקת ריתוכי פנים ואלקטרופיז'ן בצנרת פוליאתילן בשטח. כמו כן, מתוארים מספר ניסויים שבהם נעשה שימוש במערכת זו בסביבת מפעלים ובשטח, והניסיון הנוכחי לפתח סטנדרטים בינלאומיים לבדיקה נפחית לריתוכי צנרת פוליאתילן.

מילות מפתח: פוליאתילן, צינור, ריתוך פנים, אלקטרופיז'ן, NDT, בדיקה, פגמים

1 הקדמה

צינורות פוליאתילן (PE) מציעים יתרונות משמעותיים בהובלת נוזלים על פני חומרים אחרים כגון: ברזל יצוק, פלדה, נחושת ובטון. הם לא מחלידים ויש להם תוחלת חיים ארוכה, והם פחות יקרים בהתקנה בשל משקלם הנמוך והגמישות, ושיעור הדליפה שלהם נמוך משמעותית בשל מערכת ריתוך בכל ההיקף. עם זאת השימוש בהם בסביבות בהם הסיכון הוא קריטי, כמו בתחנות כוח גרעיניות שצריכות צינורות קירור מים, מוגבל בגלל העדר שיטה אמינה ומוכחת של בדיקות אל הרס (NDT) עבור ריתוכים.

ההליך הנוכחי להבטחת איכות חיבורי ריתוך פנים (BF) ואלקטרופיז'ן (EF) בצינורות PE במהלך ההתקנה הוא תיעוד הפרמטרים שהשתמשו בריתוך, יחד עם בדיקה ויזואלית של הריתוך או המחבר המרותך ובדיקת לחץ הידרוסטטי קצר טווח, זאת בתוספת בדיקות הורסות למדגם ריתוכים שנחתכו מהחיבורים על בסיס ניסוי לטווח קצר. עם זאת, בבדיקה וויזואלית יכולים לבדוק רק את פני שטח הריתוך של הצינורות, והיא אינה מספקת ראיות על פגמים המוטבעים בתוך הריתוך או עבור ריתוכים קרים. כמו כן בעבודה הקודמת ב-TWI [1,2] הובהר כי בדיקה בלחץ הידרוסטטי תניב פסילה של ריתוכי BF ו-EF רק אם יכילו פגמים חמורים מאוד. בנוסף, אם קיים פגם בריתוך, האפשרות שייכלל פגם בדגימה שנחתכה עבור הבדיקה המכאנית קטנה. לבסוף, גם לאחר בדיקה מכאנית של מחבר ריתוך, החלפתו עם אחד שאיכותו אינו ידוע אינה מבטיחה את תקינות המערכת.

בדיקת NDT יכולה לספק ניתוח מלא של המחבר כולו ללא הרס מחברי הריתוך הטובים. לפי כך, זוהי השיטה היחידה שיש לה את היכולת להבטיח את שלמות המחברים שרותכו בצינורות PE. עם זאת, יש להוכיח כי NDT יכולה לזהות את כול סוגי הפגמים האפשריים שיפגעו בשלמות הריתוך.

2 פגמים פוטנציאליים בריתוך פנים ובריתוך אלקטרו-פיוז'ן בצנרת PE

היות וצינורות PE מותקנים בדרך כלל בשטח, הסיכוי שיהיו פגמים במחברים המרותכים גדול יותר. להלן הפגמים האפשריים:

- סטיית חיבורים: סטייה של הצינורות בריתוך BF יכולה להיגרם כתוצאה מחיבור לא תקין במכונת הרייתוך או באובליות הצינור. סטייה זווייתית בריתוך EF יכולה להיגרם אם הצינורות לא הוצמדו כראוי במהלך הרייתוך. למרבה המזל, ליקויים אלו ניתנים לאבחון בבדיקה וויזואלית במצמד המרותך.
- הכנה לא טובה של הצנרת: ישור לא נכון של הקצוות בריתוך BF עלול להשאיר מדרגה בפני הצינור, אשר יגרום לביד לא סימטרי. גם פגם זה ניתן לזיהוי בבדיקה וויזואלית. בריתוכי EF, אם פני שטח הצינור לא גורדו לפני הכנסת הצינור למצמד, הפגם לא יזוהה בהכרח באמצעות בדיקה וויזואלית. בנוסף, אם הגירוד בוצע באופן לא תקין, ונשארו אזורים שלא גורדו גם פגם זה לא יזוהה בבדיקה וויזואלית של המצמד שרותך.
- פגמים מישוריים: סוגי פגמים אלו יכולים לקרות בשני סוגי הרייתוכים EF ו-BF. הם עלולים להיגרם מטביעות אצבע, כלומר נגיעה באזור הרייתוך בזמן הוצאת מכונת היישור או נגיעה באזור שגורד במהלך הכנת הצינורות לרייתוך EF; טפטוף זיעה על האזור המיועד לרייתוך; טיפות גשם כשמקום הרייתוך חשוף לגשם. סוגים אלו של פגמים אינם ניתנים לזיהוי וויזואלי.
- חלקיקים: בסביבות יבשות עם משבי רוח, נישאים באוויר גרגירי אבק וחול קטנים שנדבקים לפני שטח צינורות ה-PE. בריתוך פנים (BF), יכולים להגיע לקצות הצינורות המרותכים במהלך הוצאת הגוף חימום וכן יכולים להידבק גם בגוף החימום עצמו. בריתוך אלקטרופיוז'ן הלכלוכים יכולים להידבק באזור המגורד בצינור לפני שיושחל למצמד, במיוחד בתעלות לחות ובוציות. שוב, סוגי פגמים אלו לא ניתנים לזיהוי על ידי בדיקה וויזואלית.
- השחלת הצינור למצמד: במצמדי אלקטרופיוז'ן, כאשר הצינורות אינם מהודקים במהלך הרייתוך הם יכולים לזוז. כלומר, הם לא יהיו תחובים במלואם כפי שצריך במצמד. סוג פגם זה יכול להיות מזוהה וויזואלית רק אם סומנו קצוות המצמד על הצינורות לפני הרייתוך.
- ריתוכים קרים: ריתוכים קרים נובעים מריתוך חלקי או לא שלם אשר נגרמים מחדירה לא מספיקה של שרשרת מולקולארית וגיבושם בנקודת המגע, הגורם לכך שהריתוך נכשל כאשר הוא נבדק בבדיקה מכאנית. ריתוכים קרים יכולים להתרחש בריתוכי BF אם תהליך פעולת הרייתוך מתבצעת תחת תנאי מזג אוויר קרים ורוחות ללא הגנה מספקת ויכולה להתרחש גם בריתוכי EF אם ישנו מרחק גדול בין הצינור למצמד, לדוגמה, אובליות של צינור, או אם זמן החימום הסתיים לפני הזמן הדרוש.

3 פיתוח שיטות מערכת בדיקה אולטרסונית בצינורות PE

סוגי הרייתוכים EFi BF דורשים טכניקות בדיקה שונות. שני הטכניקות המשמשות לבדיקות הרייתוכים מוצגות באיור 1.

טכניקת הבדיקה לחיבורי האלקטרופיוז'ן היא סריקה ליניארית של 0 מעלות, תוך התמקדות באזור הרייתוך בין מצמד לצינור; ראה איור 1(a). הגורמים הקריטיים ביותר לבדיקת הרייתוכים של האלקטרופיוז'ן הם כיסוי מלא של כל המצמד ותצוגה. אזור הרייתוך נמצא בדרך כלל מתחת לחוטי החימום וקיים צורך לתצוגה טובה סביב החוטים. בדרך כלל, עם העלאת התדר, גם הרזולוציה עולה. עם זאת, פוליאיתילן הוא חומר בעל ניחות גבוה ואף מתגבר במספר דרגות כתלות בתדר [3]. על כן, התדר צריך להיות נמוך עבור מצמדים גדולים ועבים, כדי להשיג מספיק מרחק התפשטות של גלי הקול. למרבה המזל, במצמדי אלקטרופיוז'ן גדולים, קוטר החוט ומרווח החוטים באופן נורמלי גדולים לכן גם הרזולוציה תהיה מספקת. עבור צינורות קטנים הן קוטר החוט והן המרווח קטנים יותר, ולכן דרושה בדיקה עם תדר גבוה בכדי

שתהיה אפשרות לבדוק את אזור הריתוך.
לבדיקת ריתוכי BF השתמשו בשתי טכניקות שונות: הד-דופק סקטוריאלי (sector pulse-echo) וגל זחילה (creeping wave); ראה איור 1(b).
הטכניקות משלימות אחת את השנייה ומכסות על כל אזור הריתוך. טכניקת משדר הגל משתמשת בכל מערך הבדיקה ליצירת צמצם, שסורק את הגלים בטווח זוויות כדי לכסות את רוב אזור הריתוך, למעט כמה מילימטרים שקרובים לפני שטח החיצוניים. טכניקת גל זחילה (creeping wave) נועדה לכסות את האזור הקרוב לפני השטח החיצוניים, המהווה החלק בריתוך שאינו מכוסה על ידי טכניקת הד-דופק הסקטוריאלי (sector pulse-echo).

התצורה של טכניקת גל זחילה (creeping wave) משתמשת בסריקת זוויות גדולות, המייצרת גלים אורכיים המתפשטים במהירות מתחת לפני שטח הבדיקה, כדי לזהות פגמים על פני השטח וליד פני השטח (כלומר, כמה מילימטרים בפני שטח החיצוניים).

4 פיתוח של מערכת הבדיקה

מערכת בדיקת המערך האולטראסוני מורכבת מהרכיבים הבאים:

- מערך גששים (phased array probe) המייצרים את האות האולטראסוני ומזהים את האותות המוחזרים מהפגמים בריתוך.
- טריז בדיקה, אשר מבטיח כי האולטראסונד מועבר מן הגשש לתוך הצינור PE או למחבר בזווית הנכונה במינימום איבוד אנרגיה.
- מחזיק גשש, שמבטיח מגע טוב בין טריז הבדיקה לצינור/מחבר בכול היקף הריתוך.
- סורק, הנושא את מכלול הגשש סביב הריתוך ללא כול תזוזה צרית ומתעדת את מיקומו ההיקפי.
- גלאי הפגמים, ששולח אותות חשמליים לרכיבי הגשש ומנתח את האותות החוזרים.

4.1 מערך הגששים

כפי שהוזכר קודם לכן, פוליאטילן הוא חומר בעל ניחות גבוה לאולטרסאונד, ולכן במיוחד עבור חומר זה הגששים צריכים להיות ייעודיים לו. נמצא כי, על מנת לבדוק חיבורי EF-I BF בקטרים 90 מ"מ עד 800 מ"מ, נדרשות מינימום 4 גששים שונים (טבלה 1).

4.2 טריזי בדיקה

כדי לבצע את הבדיקה על צינורות פלסטיק, תוכננו ויוצרו טריזים חדשניים עם קרום מים. היתרונות בשימוש טריזי המים שהם מאפשרים ניחות נמוכה ומהירות יחסית לניתוב האותות המשופעים. חלק מהטריזים/גששים מוצגים באיור 2.
עבור ריתוכי פנים, זווית הטריזים הותאמה בכדי לצמצם את הניתוב האלקטרוני באלמנטים של הבדיקה.
עבור ריתוכי האלקטרופיוז'ן, נדרשים טריזים בזווית 0° . הקרום עשוי מחומר גמיש שמותאם לפני שטח הצינור והריתוך, ולשמירת המים בטריז.

4.3 מערכת הסריקה

מערכת הסריקה, שתוכננה ומיוצרת במיוחד לבדיקת ריתוכי צינורות פוליאטילן, גמישה ולכן מאפשרת לבדוק צינורות ומצמדים במידות שונות. היא כוללת מנגנון התאמה ומסגרת שמחזיקה את המערכת בציר קבוע מסביב לצינור על ידי מספר חוליות (איור 3).

המסגרת העיקרית כוללת מקודד, אשר רושמת את המיקום ההיקפי מסביב לחיבור, וגם כן את האחיזה של ראשי הגשש. עבור קטרים הגדולים מ-90 מ"מ, מכלול הטריז/גשש עבור שתי תצורות הריתוכים משתמש באותו מחזיק גשש.

4.4 גלאי הפגמים

גשש המערך האולטראסוני משתמש בבקרי מערך הכוללים חומרה ותוכנה לביצוע הבדיקות. ישנן מספר מערכות בדיקה ניידות עבור בדיקות שטח. הדרישות הבסיסיות של גלאי הפגמים שמתאים לבדיקת ריתוכים לצינורות פוליאטילן, הוא מכשיר התומך ב-128 אלמנטים במתמרי המערך, תוך יכולת לטפל ב-32 אלמנטים בו זמנית.

5 הערכת מערכת הבדיקה

5.1 במעבדה

על מנת שמערכת הבדיקה תהיה בעלת ערך לתעשייה, כול הפגמים הרלוונטיים צריכים להיות מזוהים. מסיבה זו, המערכת והנהלים הקשורים נבדקו במעבדה על מעל 200 ריתוכים ומצמדים של צנרת פוליאטילן בקטרים בין 180 מ"מ – 710 מ"מ, המכילים פגמים מלאכותיים. השימוש בפגמים מלאכותיים נעשה על מנת להגדיר את יכולות הגילוי של שיטת ה-NDT ולקבוע את הגודל הקריטי או ריכוז הפגמים שפוגעים בשלמות הריתוך, ולכן הכרחי היה לדעת את המיקום המדויק, הגודל, והכמות של כול סוג פגם.

הפגמים המלאכותיים שהשתמשו בהם היו:

- דסקיות אלומיניום, עובי $25\mu\text{m}$, המדמות פגמים מישוריים נפרדים. ניסוי קודם ב-TWI הראה כי דסקיות מתכת דקות נותנות סימולציות טובות יותר של חוסר ריתוך במחברי פוליאטילן [4].
- גרגרי טלק מיקרוסקופי, גודל החלקיקים $> 45\mu\text{m}$, המדמים חלקיקים עדינים.
- גרגרי חול סיליקה, גודל החלקיקים 150-300 μm , המדמים חלקיקים גסים.

איורים 4 ו-5 מציגים תמונות אולטראסוניות של ריתוך EF בצינור 225 מ"מ המכיל דיסקת אלומיניום בקוטר 2 מ"מ. כמו כן, הצינור לא הוכנס עד הסוף במצמד (pipe under-penetration), בהתאמה. שני סוגי הפגמים ניתנים לגילוי בבירור.

איור 6 מציג תמונות של ריתוך EF תקין בצינור 450 מ"מ וריתוך קר שבו זמן הריתוך קוצר ב-50% מהוראות היצרן. קו האינדיקציה מעל חוטי החימום מוצג כגבול של אזור הריתוך במצמדי EF [5]. המרחק בין אינדיקציית גבול אזור הריתוך ואינדיקציה חוטי החימום יכולה לשמש לזיהוי ריתוכים קרים [5-7].

איור 7 מראה תמונה אולטראסונית של ריתוך EF בצינור 225 מ"מ המכיל גרגרי חול ו איור 8 מראה תמונת הד-דופק סקטוריאלי (sector pulse-echo) מריתוך BF בצינור 355 מ"מ המכיל פגם של 4 מ"מ בממשק הריתוך. שוב, שני סוגי הפגמים ניתנים לזיהוי.

תוצאות הניסויים במעבדה הראו כי המערכת הבדיקה יכולה לזהות את הפגמים הבאים באופן עקבי, הן בריתוכי BF והן ב-EF:

- פגמים בפני שטח, חוסר בריתוך וחללים בקוטר עד 1 מ"מ.
- חלקיקים עדינים וגסים
- ריתוכים קרים
- אם הצינור הושחל באופן תקין למצמד ה-EF (under-penetration)

ההשפעה של פגמים אלה על הביצועים של המחברים בטווח הקצר והרחוק נבדקה גם על ידי בדיקות מכניות על מנת לפתח קריטריונים קבילים לפגמים.

5.2 במפעל

צינורות הפוליאיתילן שהיו אמורים להיות מותקנים בתחנת כוח בריטית נבדקו במפעל ברות'רהאם, לפני שנמסרו. הצינורות היו בקוטר שבין 450 מ"מ ל-630 מ"מ ועובי הדופן שלהם בין 36 מ"מ ל-60 מ"מ. בסך הכול, נבדקו כ-88 ריתוכי פנים (איור 9).
איור 10 (א) מציג תמונה של סריקה סקטוריאלית סביב אחד הצינורות שבו היה אינדיקציה לפגם בחיבור. מיקום האינדיקציה סומן על הצינור, ולאחר מכן, נחתך החיבור והקטע המסומן גולח על ידי מכונת ריתוך פנים. לאחר מכן נותחו השבבים לכל פגם שיכול היה להיות במיקום שסומן.
איור 10(ב) מציג תמונה של הגילוח במקום האינדיקציה וחושף את הפגם החיבור.

5.3 בשטח

בדיקות שטח נערכו בבריטניה ובמדינות אחרות. איור 11(א) מציג את הציוד שהשתמשו בו לבדיקת ריתוכי EF של 710 מ"מ בצפון ווילס, עבור מערכת צינורות שהותקנה בתחנת כוח הידרואלקטרית. תמונה 11(ב) מציגה בדיקה שמבוצעת על צינור 250 מ"מ לריתוכי EF למערכת צינורות גז בשפילד, בריטניה.
איור 12 מציג את מיקומם של מספר ריתוכים מ-30 ריתוכי פנים ואלקטרופיוז'ן שנבדקו במרכז העיר מילאנו.
קוטרי הצינורות נע בין 90 ל-315 מ"מ. לאחר השלמת הבדיקות נחתכו חלק מהריתוכים על סמך תוצאות הבדיקה. איור 13 מציג התאמה אופיינית בין חתך ותמונה אולטראסונית.

6 פיתוח התקנים

העבודה שבוצעה על ידי TWI בפיתוח טכניקת הבדיקה האולטראסונית לריתוכי פוליאיתילן משמשת כבסיס לשני דוחות חדשים של ISO Technical שפותחו ב Working Group- ISO/TC138/SC5/WG17 (צינורות פלסטיק, מחברים ושסתומים – שיטות בדיקה חלופיות).
טיוטת הדוח הטכני ISO/DTR 16943 (בדיקת מצמדי אלקטרופיוז'ן באמצעות שיטת בדיקת המערך האולטראסוני) אושרה בנובמבר 2014, ואמורה להתפרסם במהלך שנה זו, ואת טיוטת הדו"ח הטכני בבדיקות ריתוכי הפנים באמצעות שיטת הבדיקה של המערך האולטראסוני נבדקת על ידי צוות העובדים. בנוסף, מספקת TWI את הקלט לקוד ה- ASME BPV Code Section III Mandatory Appendix XXVI (כללים לבניית תשתית צינורות פוליאיתילן מתחת לאדמה מסוג 3) ב-NDT למחברי צינורות פוליאיתילן.

7 מסקנות

מערכת הבדיקה האולטראסונית NDT לבדיקת ריתוך פנים ואלקטרופיוז'ן בצנרת פוליאיתילן, בקטרים חיצוניים הנעים בין 90 ל-800 מ"מ, ועובי דופן בין 8 ל-65 מ"מ פותחה ונוסתה הן במעבדה והן בבדיקות שטח. התוצאות של ניסויים אלה הראו כי:

- בשני סוגי הריתוכים, EF ו-BF ניתן לבדוק צינורות פוליאיתילן בהצלחה בשטח - בחפירות ובתעלות.
- ניתן לקבל ניתוח ראשוני לכול מחבר באופן מיידי לאחר בדיקה, על מנת שיהיה אפשר לתת משוב לאיכות המחבר ולפסול את המחבר במקרה הצורך על בסיס ניתוח זה.
- יש קוראלציה מצוינת בין תוצאות הבדיקה לבין הדוגמאות שנבדקות לאחר מכן.

8 מקורות

1. C.I. Brown and M.J. Troughton, 'Qualifying long-term performance of butt fusion welds in PE pipes from short-term tests', Plastics Pipes XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
2. M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano, "Comparison of long-term and short-term tests for electrofusion joints in PE pipes", Plastics Pipes XIII Conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
3. L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisauskas, 'Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples', Ultragarsas, Vol. 65(4), 2010.
4. I.J. Munns and G.A. Georgiou, 'Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes', Insight, 41(5), 1999.
5. C. Bird, D. Caravaca and A. Raude, 'The inspection of cold welds in electrofusion joints'. Plastics Pipes XIII conference, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
6. M. Troughton, M. Spicer and F. Hagglund, 'Development of ultrasonic phased array inspection of Polyethylene pipe joints', ASME 2012, Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto, Canada, 15-19 July 2012.
7. J. Shi, J. Zheng, W. Guo and C. Xu, 'Safety assessment of cold welding defect in electrofusion joint of polyethylene pipe', ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2012-78655, 2012.

9 מחברי המאמר

ד"ר מייק טורט'ון הוא מנהל הטכנולוגי לפלסטיקה ב-TWI ואחראי על התיאום במו"פ וייעוץ והדרכה בתחום הפולימרים. תחומי ההתמחות העיקריים שלו כוללים ריתוך, בדיקות ובדיקות מכניות לצינורות פוליאתילן, שבהם כתב מעל כ-30 מאמרים טכניים. כמו כן הוא העורך של מדריך מחברי פלסטיק – מדריך מעשי, ניהל מעל 80 פרויקטים של מחקר וייעוץ ללקוחות בכול רחבי העולם, כולל שלושה פרויקטים במימון אירופאי, עם ערך כולל של מעל 5 מיליון אירו, על פיתוח שיטות לבדיקה אולטראסונית של ריתוכים בצנרת פוליאתילן.

הוא המומחה הבריטי הראשי בוועדת התקנים האירופית CEN/TC249/WG16 (ריתוך של חומרים טרמופלסטיים) והיה אחראי על הפיתוח של התקן בינלאומי היחיד לבדיקה לא הרסנית של ריתוכים בטרמופלסטיק, ויו"ר של מספר וועדות ארציות ובינלאומיות בנושא ריתוך פלסטיק והמומחה הבריטי במספר וועדות תקנים (ISO, CEN, ASTM, AWS and ASME).

ד"ר פרדריק הוגלונד בעל ניסיון של מעל 10 שנים בתחום ה-NDT, אולטראסונד וטכנולוגיות מדידה בתעשיית המחברים, פרסם יותר מ-30 מחקרים, משתתף בפגישות ופעיל בכתיבת תקני ISO ו-ASME.

פרדריק הצטרף לטכנולוגיית אל הרס של קבוצת TWI שעוסקת במחקר, פיתוח ויישום הטכנולוגיה האולטראסונית. במהלך הקריירה שלו הוא פיתח מומחיות נרחבת בטכנולוגיית אולטראסונד, עיבוד אותות, בדיקות מערך מופע אולטראסונית. במהלך השנים ב-TWI, פרדריק זכה במספר פרויקטים משותפים, כולל פיתוח תחום מחקר ב-NDT

כמו למשל תהודה לא ליניארית ובדיקת חומרים רב שכבתית.