

כנס שישי לבדיקות לא הורסות במזרח התיכון, 7-10 לאוקטובר 2012, ממלכת בהריין

6th Middle East Nondestructive Testing Conference, 7-10 October 2012, Kingdom of Bahrain

## בדיקת מערך מופע אולטראסוני לריתוך מחברים בצינורות פלסטיק (PE)

### Phased Array Ultrasonic Testing of Welded Joints in Plastic (PE) Pipes

Fredrik HAGGLUND <sup>1</sup>, Malcolm A. SPICER <sup>1</sup>, Mike J. TROUGHTON <sup>1</sup>

<sup>1</sup> TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, CB21 6AL, Cambridge, UK;

Phone: +44 (0) 1223 899000, Fax +44 (0) 1223 890952;

fredrik.hagglund@twi.co.uk, malcolm.spicer@twi.co.uk, mike.troughton@twi.co.uk

#### תקציר

קיים צורך בבדיקת אל הרס אמינה לבדיקת ריתוכים בשיטת ריתוכי פנים (BF) לצינורות פוליאיתילן (PE) במידות מגוונות וחומרים בדרגים שונים. אופיים של ריתוכי הפנים גורם לאזור הריתוך להיות קטן יחסית ובכך גורם להגבלה לעיתים קרובות על ידי ה"ביד" (bead) שנוצר בתהליך הריתוך בפני השטח החיצוניים. הביד מגביל את מיקום הגשש לחומר ה-PE יש מהירות הולכת קול נמוכה (velocity) והנחתה גבוהה של התדר (attenuation), אשר יקשה בבדיקה בצינורות עבים. במאמר זה, מוצגות ונבחנות השיטות ויכולות האולטראסאונד הרב שלבי. הטכניקה משתמשת בטריזי מים מותאמים שמסוגלים לייצר גלי קול שנוטים בזווית כדי לכסות על אזור ריתוך צינור ה-PE כולו. שיטות אלו פותחו לצינורות בעלי קוטר חיצוני בין 710-220 מ"מ ועובי דופן בין 14-45 מ"מ. הפרמטרים של הגשש והטריז תוכננו במיוחד לטווח צינורות אלו. בנוסף מוצגות היכולות לזהות פגמים בגודל של 1.5-8 מ"מ בצינורות בקטרים 710-220 מ"מ באמצעות בדיקה אולטראסונית, ואת האתגרים שנדרש להתגבר עליהם בעבודה עם סוג חומר כזה. מילות מפתח: בדיקה אולטראסונית, בדיקת צינורות פלסטיק, חיבורי ריתוך פנים.

#### 1 הקדמה

עשרות שנים השתמשו בצינורות מסוג פוליאיתילן להובלת גז ומים. היות ומדובר בחומר שחסין מפני קורוזיה של המים וכן בעל התנגדות רבה לעכירות, בתחנות כוח גרעיניות סברו כי רצוי להחליף את הפלדה המצופה בפחמן בפוליאיתילן מטעמי בטיחות. אולם, הרשויות הרגולטוריות בתחום דורשות לבחון את הנפח של הריתוכים, ונכון לעכשיו, אין מערכת זמינה מהסוג הנ"ל. על כן, קיים צורך בבדיקה אמינה ולא הרסנית (NTD) לבחינת הריתוכים וצינורות בגדלים וחומרים שונים העשויים מפוליאיתילן.

למרות קיומם של סטנדרטים אירופאיים לבדיקה וולומטרית של צינורות פלסטיק מרותכים, ישנו מחסור במערכות בדיקה כאלו הזמינות בשוק. הבדיקה הטובה ביותר הקיימת לבחינת ריתוכים בצינורות פלדה בקטרים גדולים מבוססת על בדיקות אולטראסאונד. אחת הבעיות העיקריות שבגללן לא משתמשים בשיטה זו בתעשיית צינורות הפלסטיק, היא היותו של הפלסטיק חומר קשה לבדיקה

בגלל תכונותיו האקוסטיות – הוא בעל הנחתה גבוהה של הקול (attenuation) ומהירות הולכת קול נמוכה (velocity).

מספר מחקרים נערכו על מנת לפתח שיטת NDE אמינה לבחינת ריתוכי BF. השתמשו במספר טכניקות שונות תוך שימוש במתמירים אולטראסוניים [2,3]; הכוללים טנדם, הד-דופק סקטוריאלי, גל זחילה ו-TOFD (tandem, Sector pulse-echo, creeping wave, time-of-flight diffraction TOFD) בשנים האחרונות, המחקרים הורחבו לבחינת ריתוכי BF על ידי בדיקת אולטרסאונד רב שלבי (PAUT) [4-7].

קיימות מערכות בדיקת אולטרסאונד לצינורות פלסטיק בצפון אמריקה ובדרום קוריאה [8,9]. עם זאת, אף אחת מהמערכות אינה מהווה פתרון מלא לבעיה. המערכת האמריקאית מוגבלת לריתוכי BF, והיא מבוססת על שיטת TOFD ולא על אולטרסאונד רב שלבי ועל כן, המערכת אינה יודעת להתמודד עם תצורות ריתוך מורכבות יותר. המערכת הקוריאנית מוגבלת לחיבורי אלקטרופיז'ן (EF) ואינה מבצעת תיעוד.

העבודה המוצגת במאמר זה הינו חלק מפרוייקט TestPEP, פרוייקט במימון אירופאי שמטרתו להביא לפיתוח והקניית תוקף לגישה של NTD אוטומטית לבחינת צינורות PE מרותכים. הפרוייקט יפתח נהלים לשימוש בשיטת אולטרסאונד רב שלבית וכן ציוד לבחינת הנפח של המחברים המרותכים בצינורות PE. במאמר זה, מוצגת ההתקדמות בפיתוח אותן טכניקות הבדיקה עבור ריתוכי BF בצינורות בגדלים שונים. כדי לבדוק את החיבורים נדרש ליישם מספר שיטות נפרדות כדי לכסות באופן מלא את אזורי הריתוך. נעשה פיתוח מקיף של הטכניקות, והטכניקות נבדקו על מספר דוגמאות. מוצגות תוצאות בדיקה ראשוניות לצינורות לדוגמא ויכולות הבדיקה של הטכניקות.

## 2 חומרים וציוד

בחלק זה מתוארים המאפיינים האקוסטיים של חומר הפוליאתילן (PE) המשמש לייצור צינורות הפלסטיק, יחד עם תצורת הריתוך שנבדקה במאמר זה. מוצגים גם כן מדגם הבדיקה, הציוד כמו למשל הגששים, הטריזים וכן מערכת הסריקה שתוכננה ויוצרה.

### 2.1

פוליאתילן הוא חומר מורכב בשל מהירות הולכת קול נמוכה (velocity) והנחתה גבוהה של הקול (attenuation). גלי S (Shear Waves) אינם טובים לשימוש בצינורות PE- עקב מאפייני החומר שגורמים לכך שניתן לבצע בדיקה רק על ידי הגלים האורכיים. מהירות הגלים האורכיים משתנה על סמך דרג הפוליאתילן וגם על סמך אצוות שונות של חומר הפוליאתילן. כמו כן המהירות יכולה להשתנות בהתאם לעובי דופן הצינור וזווית כניסת הקול למבנה הגבישי [10]. משמעות הדבר היא כי עבור פתרונות בדיקה מדויקים, יש צורך לקבוע מאפיינים אקוסטיים עבור כול טווח של קוטר חיצוני ועובי הדופן של הצינורות.

העבודה הראשונית הכרוכה בקביעת המאפיינים האולטראסוניים של צינורות מחומר PE גנרי [11], מראה שהמהירות תלויה בצורה חלשה בתדירות לעומת הניחות (attenuation) שתלויה בתדירות גבוהה. החומרים שנבדקו במחקר הם ה-PE80 וה-PE100. הצינורות עם הקוטר החיצוני 355 מ"מ יוצרו מ-PE80 והצינורות בקוטר 220 מ"מ ו-450 מ"מ יוצרו מ-PE100. נקבעו מהירויות הגלים האורכיים בכול קטע שונה בצינור, על ידי מדידת זמן העיכוב של האותות האולטראסוניים בבדיקות דגימה מיוחדות בשיטת קורלציה צולבת (cross-correlation). המהירות הכללית הממוצעת של הגלים האורכיים ב-PE80 הייתה 2349.5m/s עם סטיית תקן של 0.75% מהערך הממוצע.

המהירות הכללית הממוצעת של הגלים האורכיים ב-PE100 הייתה  $2385.8\text{m/s}$  עם סטיית תקן של  $0.75\%$ . הניחות והתלות בתדר גבוה מאוד בחומר ה-PE, שנמדדה כ- $0.5\text{dB/mm}$  ב- $2\text{MHz}$  ו- $1.1\text{dB}$  ב- $4\text{MHz}$ .

ריתוכי ה-BF נוצרים באמצעות גוף חימום שממס קצוות של שני צינורות אשר מרותכים יחד על ידי לחץ שמופעל לזמן מסוים (איור 1(א)). לאחר מכן תהליך הריתוך יוצר בידיים בפני השטח החיצוניים והפנימיים מעודפי החומר של הצינור (איור 1(ב)). ריתוכים גרוועים ניתנים לזיהוי על ידי בדיקה חזותית בביד החיצוני של הריתוך. עם זאת, הביד של הריתוך יכול להיות שלם ללא עיוותים ובכול זאת הריתוך יכול פגמים. במדינות ובתעשיות מסוימות, מסירים את הבידיים לאחר סיום מחזור הריתוך. עם זאת, במקרים מסוימים, במיוחד בתשתיות, הביד של הריתוך נשאר שלם. השיטות שפותחו במחקר זה מיועדות לבדיקת מחברי BF עם בידי ריתוך שלמים, שכן יהיו השלכות מעשיות על טכניקות הבדיקה שפותחו ובבחירת הגששים והטריזים, בייחוד בשל העובדה שהעובי של הביד ישתנה בהתאם למידות הצינור ותהליכי הריתוך (איור 2).

## 2.2 בחינת דוגמאות

בעת פיתוח שיטות הבדיקה עבור ריתוכי BF, נבדקו דוגמאות עם פגמים מלאכותיים, בטווח צינורות בקטרים חיצוניים בין  $220\text{mm}$  עד  $450\text{mm}$ . קידוח חורים שטוחים בתחתית (FBHs) היה מספיק כדי להעריך את הביצועים של השיטות המוצעות. ה-FBHs קודחו בקצה הצינור ואפשר היה לבחון את שיטות הטנדם העצמי (self-tandem) והד-הדופק הסקטוריאלי (sector echo-pulse) דרכו. הסדר של ה-FBHs לצינור בעל הקוטר החיצוני  $220\text{mm}$  מוצגים באיור 3(א') וכול ה-FBHs שקודחו בצינורות האחרים נתונים בטבלה 1. מוצג באיור 3(ב) מיקום הגשש בבדיקה של ה-FBHs בצינור  $220\text{mm}$ . העומק של ה-FBHs הוא כ- $40\text{mm}$  מקצה הצינור, וגשש הבדיקה ממוקם כ- $47\text{mm}$  מן הקצה, מה שמשאיר כ- $7\text{mm}$  מרחק בכדי לדמות את מרחק הביד (bead) של ריתוך.

## 2.3 גששים, טריז מים ומערכת סריקה

לצורך בחינת שיטות הבדיקה, השתמשו בשתי סדרות שונות של מערך בדיקות במימד לינארי אחד. עבור צינורות קטנים, נלקחו לשימוש גששי  $4\text{MHz}$  עם  $32$  אלמנטים ולצינורות גדולים גששי  $2\text{MHz}$  עם  $32$  אלמנטים. נדרשו אלומות קול שמוטות בזווית כדי לבצע בדיקות לריתוכים (BF) ומאחר שיכולות הניתוב מוגבלות עם גששים אלו, השתמשו בטריזים זוויתיים כדי להקטין את הניתוב על ידי האלמנטים של המתמר.

כדי לבצע את הבדיקות על צנרת פלסטיק, תוכננו ויוצרו אבי טיפוס של טריזי מים חדישים. היתרון בשימוש טריזי מים הם הניחות הנמוכה ויחס המהירות שמאפשר ניתובם של האלומות בזווית לאזור הריתוך. נדרשות זוויות גבוהות כיוון ש-ביד הריתוך מונע מיקום אופטימלי של הגששים. הטריזים והגששים מוצגים באיור 4, הגשש  $4\text{MHz}$  מוצג בתמונה (א') והגשש  $2\text{MHz}$  מוצג בתמונה (ב'). מוצג בתמונה גם האיטום הגמיש בתחתית טריז הגשש כדי לשמר את המים ביעילות.

מערכת הסריקה עוצבה כך שתשמש לבדיקת צינורות מרותכים, ראה איור 5. מערכת הסריקה כוללת משטח ראשי המוחזק על ידי שרשרת חוליות ומנגנון כוונן שמחזיק את הגששים מסביב לצינור. מערכת זו אמורה לאפשר בדיקת צינורות עם קוטר חיצוני בין  $90\text{mm}$  ל- $1000\text{mm}$ . המשטח הראשי יכול את המקודד וגם כן את התמיכה בראשי הבדיקה. מוצגים באיור 5(a) ו 5(b), מערכת הסריקה

הגמישה ושני מחזיקי הראשים לריתוך BF. הגששים שומרים על המגע עם הצינור באמצעות קפיצים, והצימוד נשמר על ידי אספקת מים קבועה.

### 3. שיטות בדיקה

עבור הבדיקה של ריתוכי BF נחקרו ארבע טכניקות שונות; טנדם עצמי, הד-דופק סקטוריאלי, גל זחילה ו-TOFD (איור 6) (tandem, creeping wave, sector pulse-echo and time-of-flight diffraction TOFD). הטכניקות, ברוב המקרים, משלימות זה את זה הן מבחינת הכיסוי והן בזיהוי הפגמים השונים.

הד-דופק הסקטוריאלי (sector pulse-echo) משתמש בכול רכיבי המערך בכדי ליצור צמצם, שאוסף את האלומות מהזווית הנמוכה עד הגבוהה. הטכניקה נותנת סקירה של הריתוך, ומטרתה לכסות את רוב אזור הריתוך, למעט כמה מילימטרים שקרובים לפני השטח.

טכניקת הטנדם העצמי (self-tandem) משתמשת במחצית האלמנטים של המערך לצורך שידור ובחצי השני לקבלה. הטכניקה מועילה לאיתור פגמים בפני השטח, אך היא מוגבלת לשטח הקרוב לפני השטח הפנימיים.

טכניקת גל זחילה (creeping wave) מיועדת לכסות את אזור פני השטח החיצוניים, המהווה את קטע הריתוך שלא מכוסה על ידי שתי הטכניקות הקודמות. התצורה של טכניקת גל זחילה משתמשת בזווית סריקה סקטוריאלי גבוהה, המפיק גלי דחיסה המתפשטים מיד מתחת לפני שטח הבדיקה, כדי לזהות שבירת-פני שטח ופגמים ליד פני השטח.

טכניקת ה-TOFD (time-of-flight diffraction), מטרתה לכסות את אזור הריתוך כולו. השיטה מנצלת את העקיפה קדימה והרגישות לפגמים אנכיים. השיטה משתמשת בשני גששים והתצורה מוערכת בשלב הזה של הפרויקט היא שיטת pitch-catch שמשמשת בשני אזורי סריקה. עם שיטה זו, שני המתמרים משתמשים בצמצם גדול כדי להעביר אלומות המכסות את הריתוך כולו.

### 4. תוצאות

חלק זה מציג את התוצאות באמצעות שיטות טנדם עצמי והד-דופק סקטוריאלי, על דגימות של צינורות בקטרים חיצוניים ועובי דופן שונים. לכל הצינורות הוחדרו FBH לקצה בקטרים שונים ובמקומות שונים, ראה טבלה 1 לפרטים. כול ה-FBHs עגולים, אך בחלק מן השרטוטים הסכמטיים נראים אליפטיים, בגלל שינוי יחס אורך-גובה למטרות תצוגה בלבד.

בכול סעיף בחלק זה מוצגות שלוש תמונות: ציור סכימטי של חתך הצינור, תוצאות הבדיקה לפי שיטת הד-דופק סקטוריאלי ותוצאות הבדיקה לפי הטנדם. משמאל לשרטוטים של החתך-רוחב מוצגות שתי עמודות המציגות את הכיסוי התיאורטי של כול שיטה.

העמודה השחורה מציגה את הכיסוי הישיר של שיטת הד-דופק סקטוריאלי וזו שבאפור הכהה מציגה את הכיסוי הישיר של שיטת הטנדם. האפור הבהיר בקצות העמודות מציגות את התרומה של האלומה לכיסוי. הכיסוי בפועל במהלך הבדיקה תמיד ישתנה במידה מסוימת, בהתאם לאי התאמת הגשש, שינוי המרחק ובשינוי הלחץ המופעל עליו.

#### 4.1 מידות צינור: קוטר חיצוני 220 מ"מ ועובי דופן 14 מ"מ

מוצגים באיור 7 תוצאות הבדיקה לצינור PE100 בעל קוטר חיצוני 220 מ"מ ועובי דופן 14 מ"מ. בתמונה העליונה מוצג שרטוט סכמטי של חתך הצינור עם FBHs. תוצאות הבדיקה של הד-דופק

סקטוריאלי מראה כי הטכניקה זיהתה את כול ה-FBHs. ועם טכניקת הטנדם ששה מתוך שמונת ה-FBHs זוהו.

4.2 מידות צינור: קוטר חיצוני 450 מ"מ ועובי דופן 28 מ"מ.

מוצגים באיור 8 תוצאות הבדיקה לצינור PE100 בעל קוטר חיצוני 450 מ"מ ועובי דופן 28 מ"מ. טכניקת הד-דופק הסקטוריאלי הצליחה לזהות את כול ה-FBHs, בעוד טכניקת הטנדם זיהתה באופן מהימן כעשרה מתוך ששה עשר ה-FBHs. מוצגות אינדיקציות חלשות לחלק מה-FBHs. ה-FBHs שלא זוהו הם אלה הקרובים יותר לפני שטח החיצוניים.

4.3 מידות צינור: קוטר חיצוני 355 מ"מ ועובי דופן 33 מ"מ.

מוצגים באיור 9 תוצאות הבדיקה לצינור PE80 בעל קוטר חיצוני 355 מ"מ ועובי דופן 33 מ"מ. טכניקת הד-דופק הסקטוריאלי הצליחה לזהות עשרה מתוך 16 ה-FBHs, בעוד ששיטת הטנדם זיהתה באופן מהימן שמונה מתוך 16 ה-FBHs. מוצגות אינדיקציות חלשות לחלק מה-FBHs וה-FBHs שלא זוהו הם שוב אלה הקרובים יותר לפני שטח החיצוניים.

4.4 מידות צינור: קוטר חיצוני 710 מ"מ ועובי דופן 45 מ"מ.

מוצגים באיור 10 תוצאות הבדיקה לצינור PE100 בעל קוטר 710 מ"מ ועובי דופן 45 מ"מ. שיטת הד-הדופק הסקטוריאלי הצליחה לזהות כ-15 מתוך 16 ה-FBHs, בעוד טכניקת הטנדם זיהתה באופן מהימן שבעה מתוך ה-16 FBHs.

4.5 סיכום תוצאות הבדיקה

בטבלה 2 מוצגים תוצאות הבדיקה על ידי הטכניקות הנבחנות. בסך הכול, שיטת הד-הדופק הסקטוריאלי זיהתה כ-49 מתוך 56 FBHs (88%) ושיטת הטנדם זיהתה כ-31 מתוך 56 FBHs (55%). יכולותיו הנמוכות של הטנדם לזיהוי היו צפויים, בשל שטח הכיסוי הקטן. כל ה-FBHs שזוהו על ידי שיטת הטנדם התגלו גם על ידי שיטת הד-הדופק הסקטוריאלי. ואם מתעלמים מה-FBHs הממוקמים מחוץ לכיסוי התיאורטי של שתי השיטות אז, יכולות הזיהוי גבוהות מהתוצאות הכוללות; 91% עבור הד-הדופק הסקטוריאלי ו-84% עבור שיטת הטנדם. אחוז ה-FBHs שלא התגלו הם אלה שבגדלים קטנים, ובדרך כלל קרובים לפני שטח החיצוניים.

5. דיון

פיתוח שיטות ה-PAUT הם חלק מפרויקט שמטרתו לשלב שיטות אלה במערכת הסריקה לבדיקות בשטח, שמכסה מגוון רב של צינורות פוליאיתילן בדרגים שונים ומידות שונות. לפיכך, ייתכן כי בביצועים של חומר אחד ובגדלים שונים יהיה צורך באופטימיזציה. החלק הנוסף של הפרויקט הוא עיצוב וייצור של גששים וטריזים לתצורות של מחברים ספציפיים וגדלים שונים של צינורות. יתר על כן, יכולות הזיהוי שנבחנו במאמר זה לא מביאים בחשבון את

המערכת כולה, אלא רק שתי השיטות שנחקרו. כמו כן יש לציין כי רק FBHs מעטים באותו גודל ומיקום נבדק, ואת הצורות והמיקומים של ה-FBHs לא אומתו. על מנת לקבל נתונים סטטיסטיים מדויקים, יהיה זה תועלתית יותר לבצע מחקר כמותי ניסיוני על גודל מדגם גדול יותר.

## 6. מסקנות

שיטות הבדיקה פותחו עבור ריתוכי פנים (butt fusion) בקטרים חיצוניים הנעים בין 710-220 מ"מ ועובי דופן בין 45-14 מ"מ. היכולת של השיטה נבחנה בדגימות המכילים פגמים מלאכותיים בצורת חורים שטוחים בתחתית בקצה הצינור. יכולות הזיהוי הכולל היו כ- 88% עבור שיטת הד-הדופק הסקטוריאלי ו-5% עבור שיטת הטנדם. כול הגדלים של FBH התגלו על ידי שתי השיטות וכול הגדלים של הצינורות. הסיבה העיקרית עבור FBHs שלא זוהו היה בשל המיקום שהיה מחוץ לשטח הכיסוי של השיטה. יכולות הזיהוי בתוך שטח הכיסוי לכול טכניקה היו: 91% עבור שיטת הד-הדופק הסקטוריאלי ועבור שיטת הטנדם 84% יכולות זיהוי.

## תודות

המחקר שמוביל לתוצאות אלו ממומן על ידי תכנית המסגרת השביעית של האיחור האירופי, המנוהלת על ידי [FP7/2007-2013] Research Executive Agency במסגרת הסכם המענק [2-243791]. המידע המסמך זה מסופק כפי שהוא ולא ניתנת ערבות או אחריות כי המידע מתאים לכל מטרה מסוימת. המשתמש בו משתמש במידע כסיכון ואחריות אישית.

## מקורות

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-755, "Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe. Section III, Division I, and Section XI".
2. M.J. Troughton, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", Plastics Pipes XI Conference, Munich, Germany, 3-6 September 2001.
3. I.J. Munns and G.A. Georgiou, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", Insight, vol. 41, no. 5, May 1999.
4. C. Frederick, D. Zimmerman, and A. Porter, "High-density polyethylene piping buttfusion joint examination using ultrasonic phased array", Pressure Vessels and Piping, Prague, Czech Republic, 26-30 July 2009.
5. S L Crawford, S E Cumblidge, S R Doctor, T E Hall and M T Anderson, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", PNNL, May 2008.
6. D. MacLennan, I.G. Pettigrew and C.R. Bird, "Plastic Fantastic? – An NDE inspection solution for HDPE butt welds", 18th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
7. C. Hekun, C. Zheng, C. Hong and F. Yang, "Ultrasonic phased array inspection on PE pipe heat fusion joints and electr-fusion joints", 18th World Conference in NonDestructive

Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.

8. B. Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, "Novel High Resolution Defect Detection for Thermoplastic Butt -Welds", Pipeline and Gas Journal, March 2003.

9. H.J. Shin, Y.H. Jang, J.R. Kwon and E.J. Lee, "Nondestructive Testing of Fusion Joints of Polyethylene Piping by Real Time Ultrasonic Imaging". Plastics Pipes XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.

10. J.Q. Zhao, L.Daigle and D. Beaulieu, "Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 29, no. 5, pp. 787-798, October 2002.

11. L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisauskas, "Measurement of Velocity and Attenuation for Ultrasonic Longitudinal Waves in the Polyethylene Samples", Ultragarsas, vol. 65, No. 4, 2010.