

使用 TOFD 與 PAUT 高階超音波技術追蹤金屬內部裂紋的深度

張銘坤¹、吳冠陞²、王聖惟²

¹國立雲林科技大學環境與安全工程系 助理教授

²國立雲林科技大學環境與安全工程研究所 研究生

一、前言

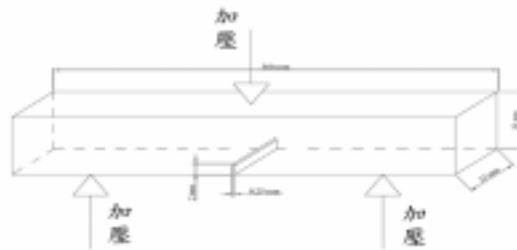
隨著工業技術的蓬勃發展提昇了生活品質，對於產品的品質要求更佳嚴格，由於金屬機械會隨著使用的時間增加與所處環境使其表面、結構、強度等物理性質造成改變甚至破壞，進而影響到人類的生命安全，因此突顯品質檢驗的重要性。利用非破壞檢驗技術，可使許多肉眼無法觀察到的瑕疵無所遁形，使得產品安全性獲得更大的保障，在這樣的情形下工業界所採用非破壞性檢測技術成為最重要的一環。

超音波檢測人工裂紋所得的結果往往與現場設備的自然裂紋不一致，實際上人工裂紋與自然裂紋的斷面形狀不同，人工裂紋斷面光滑平整而且裂紋寬度較大導致回波信號比較強烈，自然裂紋斷面則凹凸不平，裂紋寬度比較緊密導致回波信號太過於微弱，容易造成信號判定誤差，因此本研究以自然裂紋取代人工裂紋，並且將每塊試驗片切成三等份再把裂紋埋於鋼材內，模擬焊道內部自然裂紋，再運用超音波技術來檢測裂紋的大小，先比較各個檢測方法對於自然裂紋的檢測能力可靠性，最後評估縱向自然裂紋的深度差異。

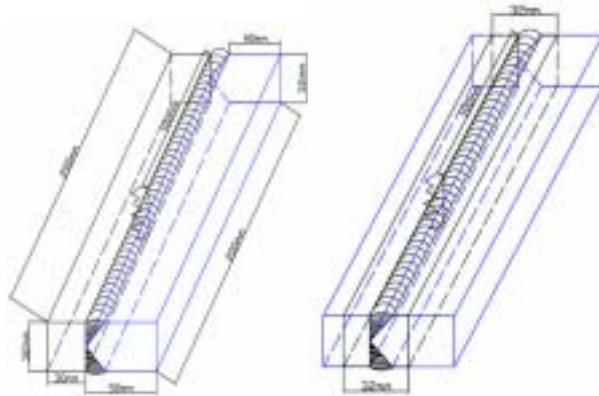
二、研究方法

(一)、試片製作

材料選定後，進行加工成長 300 mm，寬 32 mm，高 32 mm 的板狀試片後進行線切割，再將試驗片置於 50 頓壓力試驗機上，反覆施以一定壓力值，使其產生疲勞裂紋，試片承受 9450 Kgf 壓力值，如下圖一，使其產生自然裂紋後，再將人工裂紋去除，將每塊試驗片切成三等份並於裂紋三面以潛弧焊機焊接分別上配合板，使裂紋埋植於試片內部。如下圖二至圖五所示。



圖一. 彎曲試驗

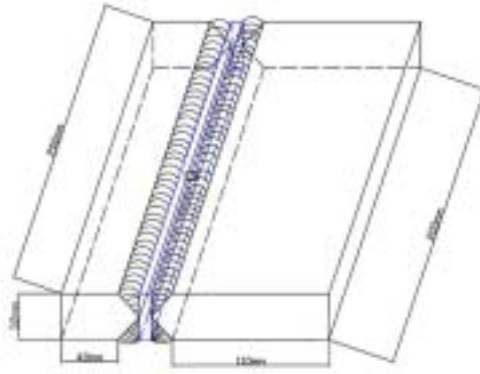


圖二. 底部配合板焊接

圖三. 裁切焊接後之配合板試片



圖四. 試片裁切成三等份



圖五. 兩側配合板焊接

(二)、檢測方式

裂紋檢測方法目前有很多種，超音波檢測可以完整評估且可判定大小。研究中將製作模擬內部自然裂紋試片，用 Time of Flight Diffraction (TOFD) 和 Phased Array Ultrasonic Technology (PAUT) 對裂紋深度的檢測，最後評估縱向自然裂紋的深度差異。TOFD 掃描的方式又分為平行掃描和非平行掃描兩種。平行掃描 (Parallel Scan)：探頭移動方向與音束平行，當掃描檢測出裂紋後，以裂紋為中心將探頭左右的擺動，可以找出裂紋瑕疵的最大上下尖端繞射波的信號。此種掃描方式屬於非固定掃描，必要時才使用；非平行掃描 (Non - parallel Scan)：音束垂直焊道，焊道置中而探頭的平行焊道移動找出裂紋瑕疵上下尖端繞射波的信號。一般焊道的掃描常用此種掃描方式，此種掃描方式屬於固定掃描。

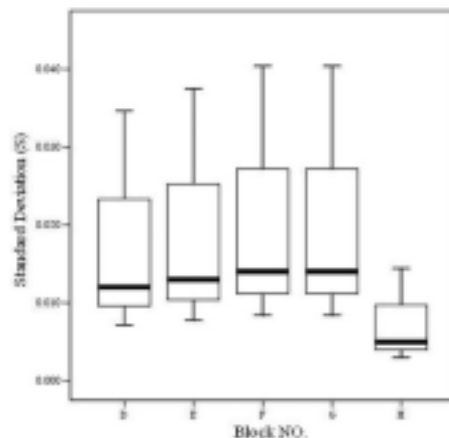
三、結果

每一塊試驗片再裁切成三等分小試驗片，在第二次焊接之前，利用顯微鏡去觀察試片的表面裂紋，表面裂紋處在熱影響區 (Heat Affect Zone; HAZ) 之內，在焊接時會產生高溫把表面裂紋熔掉，所以試片會剩下內部的裂紋瑕疵，因此顯微鏡觀察的裂紋不能代表整塊試驗片的裂紋與其他檢測做比較。其中有一片小試驗片再焊接過程中

內部有夾雜物的產生，因而會影響到超音波檢測，所以將其淘汰。

(一)、顯微鏡觀察裂紋(Metallograph)

量測裂紋高度是利用游標卡尺量測裂紋的上尖端與下尖端的距離，每一片小試驗片各量測 10 次所作的平均值，因為每一個人在量測判斷力會有差異，所以此次裂紋的深度數據以五個人去量測。所量測的數據利用統計分析，標準差介於 0.005 ~ 0.014 之間，再利用卡方分配來驗證標準差的值，每一小試驗片所量測出來的數據，在 95 % 信賴水準下，可以由圖 所示。從圖中可發現 H 標準差信賴區信比較小代表檢測出來的值越值精確性越佳，由於標準差很小，第 E、F、G 試片都有 1~2 個檢測值超過信賴界限。

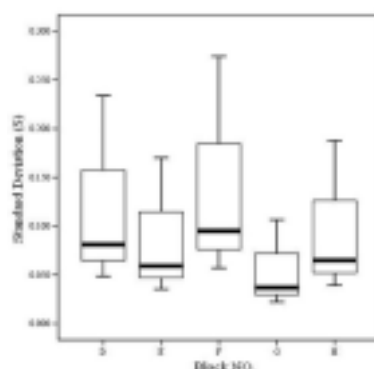


圖六.顯微鏡裂紋 95% 標準差信賴區間

(二)、飛行時間繞射法平行掃描(Time-of-flight-diffraction parallel scan)

OmniScan-TOFD 而是利用平行掃描所顯示為 B 掃描，設定完成先作初步的掃描，判斷裂紋瑕疵的位置再開始進行平行掃描，以裂紋瑕疵為中心將探頭左右的擺動，可以找出裂紋瑕疵的最大上下尖端繞射波的信號，每一片試驗片都將多次的掃描，檢測的數據利用抽籤法抽出五組數據來表示檢測的結果。所量測的數據再利用統計分析，標準差介於 0.037~0.095 間，再利用卡方分配來驗證標準差的值，每一

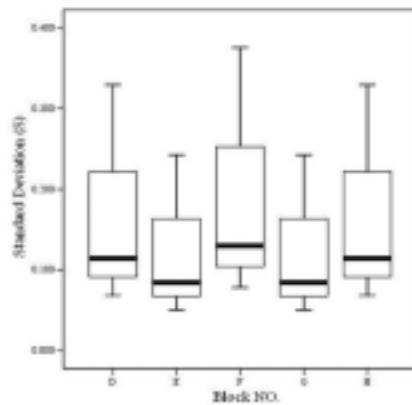
片試驗片所量測出來的數據，在 95% 信賴水準下，可以由圖七所示。從圖中可發現 E、G 標準差信賴區信比較小代表檢測出來的值精密度越佳，每一個試片都有 2 個檢測值剛好位於信賴界限。



圖七.TOFD 平行掃描裂紋 95% 標準差信賴區間

(三)、飛行時間繞射法非平行掃描 (Time-of-flight-diffraction non-parallel scan)

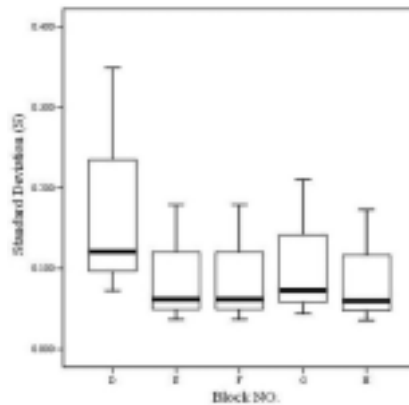
TOFD 是利用非平行掃描的方式進行掃描，所顯示圖形為 D 掃描，探頭固定在磁性玩具車，因此掃描完的檢測結果有很高的再現性。每一片試驗也將作多次的掃描，檢測的數據利用抽籤法抽出五組數據來表示檢測的結果。所量測的數據是利用統計分析，由於此方法可以設定的有效位數在小數點第一位，所以標準差因而變的比較大，標準差介於 0.084 ~ 0.130 間，再利用卡方分配來驗證標準差的值，每一片試驗片所量測出來的數據，在 95% 信賴水準下，可以由圖八所示。從圖中可發現 E、G 標準差信賴區信比較小代表檢測出來的值精密度越佳，每一個試片都有 1 組檢測值超過信賴界限。



圖八. TOFD 非平行掃描裂紋 95% 標準差信賴區間

(四)、相位陣列式超音波檢測法(Phased-Array ultrasonic testing)

PAUT 檢測時顯示器上會同時出現 A-Scan 和 S-Scan 的信號回波圖，S-Scan 圖形主要來扶助 A-Scan 的判斷。檢測探頭的角度可從 45° 到 70° 在檢測掃描當中可以隨時調整音波發射的角度，使探頭可以偵測到最強的回波信號；裂紋瑕疵位於工件的內部中，相位陣列式超音波 (PAUT) 是靠音波打到裂紋瑕疵的位置所反射回來的信號波來判斷裂紋的大小，常因為檢測到上下裂紋尖端反射回波信號太過於微弱，檢測上往往導致誤差的產生。PAUT 檢測的結果也是呈現第 D、F、H 試驗片內部裂紋比顯微鏡觀察表面裂紋來得深，第 E、G 兩片試驗片內部裂紋比表面裂紋的深度更小。量測的數據也是利用統計分析，標準差介於 $0.062\sim 0.121$ 間，再利用卡方分配來驗證標準差的值，每一片試驗片所量測出來的數據，在 95% 信賴水準下，可以由圖九所示。從圖中可發現 E、F、G、H 標準差信賴區信比較小代表檢測出來的值精密度越佳，D、G、H 這三片試驗片都有符合在信賴區間內，只有 E、F 試驗片有 1 組檢測值超過信賴界限。



圖九.PAUT 裂紋 95% 標準差信賴區間

四、討論

TOFD 技術在目前是一項高階的超音波檢測技術，主要用來檢查工件內部的缺陷，並且度量其尺寸及位置，對於缺陷的長度或深度的量測精確度可達 $\pm 1 \text{ mm}$ ；本研究分別用兩種不同掃描方式的 TOFD,以 TOFD 平行掃描對試驗片檢測可以找出裂紋瑕疵的最大上下尖端的繞射波信號，因此以 TOFD 平行掃描檢測方法作為基準設為 X 軸，再和 TOFD 非平行掃描及 PAUT 兩種檢測方法設為 Y 軸做一個比較。

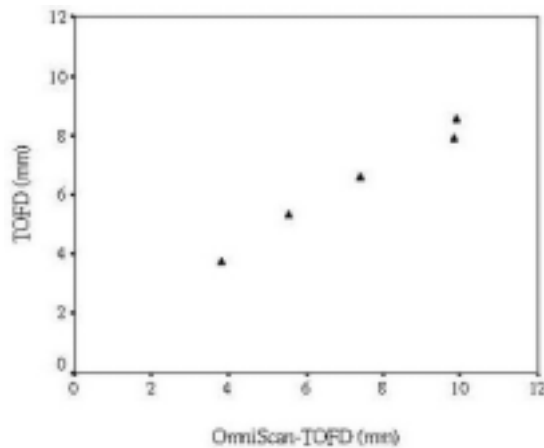
(一)TOFD 平行掃描與 TOFD 非平行掃描檢測裂紋誤差

這兩組 TOFD 所以用不同的掃描，OmniScan-TOFD 檢測是平行掃描，當掃描檢測出裂紋後，以裂紋為中心將探頭左右的擺動並且找出裂紋瑕疵的最大上下尖端繞射波的信號，TOFD 檢測是非平行掃描，探頭平行裂紋移動掃描找出裂紋瑕疵上下尖端繞射波的信號，由表一和圖十所示，結果顯示在兩側的試驗片檢測值都偏向於 TOFD 平行掃描，表示此方法對內部裂紋檢測比較準確，兩種檢測誤差介於 $-0.08 \sim -1.97$ 間。第 E、G 兩片試驗片裂紋接近於垂直對於兩種 TOFD 檢測都能有很好的檢測效果，另外 D、F、H 試驗片位於原本的試驗片的兩側屬於傾斜裂紋，裂紋傾斜的角度越大所造成的誤差就越大，由於裂紋的方向和角度無法掌握，所以非平行掃描只能當作初步的評估掃描。

表一 TOFD 平行掃描與 TOFD 非平行掃描檢測誤差

Block No.	TOFD 平行掃描	TOFD 非平行掃描	Error
D	9.83	7.86	-1.97
E	5.53	5.32	-0.21
F	9.90	8.52	-1.38
G	3.80	3.72	-0.08
H	7.39	6.56	-0.83

單位：mm



圖十. TOFD 平行掃描與 TOFD 非平行掃描檢測值比較

(二) TOFD 平行掃描與 PAUT 檢測裂紋誤差

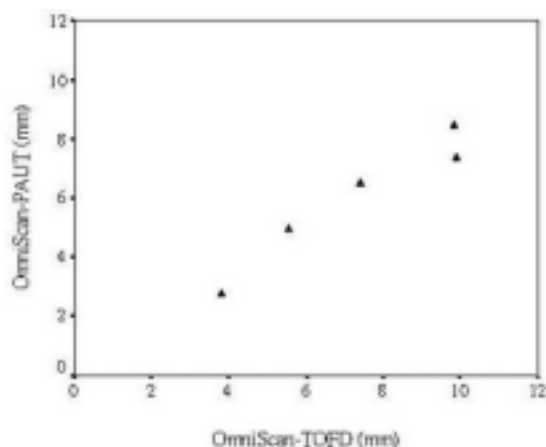
自然裂紋的斷面非常不對稱而且無規則可循算是一種極差的反射面，除此之外裂紋高度也不一致，當音束傳遞時碰到此斷面反射能量也會因角度、斷面的面積及裂紋的高度等因素影響到檢測的判讀；這兩種檢測方式皆為使用擺動掃描，TOFD 平行掃描檢測法運用繞射原理所檢測出來數據比較精確，另外一種檢測法 PAUT 是利用音波的反射原理來做檢測，由表二和圖十一所示，結果顯示檢測值都偏向於 TOFD 平行掃描表示此方法對內部裂紋檢測比較準確，兩種檢測誤差介於 $-0.58 \sim -2.55$ 間；第 E 試驗片的裂紋傾向垂直所以檢測的誤差就比較小，第 D、F 這兩片試驗片是

屬於傾斜裂紋，裂紋傾斜角度越大容易造成音波的散射使得反射波信號微弱所造成誤差，另外 G、H 試驗片由於裂紋下尖端反射回波信號太過於微弱，導致判讀所造成的誤差，相位陣列式超音波檢測法主要依靠從裂紋缺陷上反射能量的大小來判斷裂紋深度。

表二. TOFD 平行掃描與 PAUT 檢測誤差

Block No.	TOFD 平行掃描	PAUT	Error
D	9.83	8.44	-1.39
E	5.53	4.95	-0.58
F	9.90	7.35	-2.55
G	3.80	2.73	-1.07
H	7.39	6.47	-0.92

單位：mm



圖十一. TOFD 平行掃描與 PAUT 檢測值比較圖

(三) 追蹤縱向自然裂紋的差異

焊接兩側使超音波儀器可以在試驗片上可以進行做內部裂紋的檢查，兩側的裂紋處在熱影響區 (HAZ) 之內，在焊接時產生高溫會熔掉兩側的裂紋，因此超音波可以檢測到更裡面的裂紋，再加上原先用金相顯微鏡所拍的裂紋，試驗片

按照原先排列組合，編號 1、4、6 是超音波檢測技術的結果，另外編號 2、3、5 是顯微鏡檢測的結果，利用這些檢測的結果可以追蹤到自然裂紋縱向的差異，由表三所示。

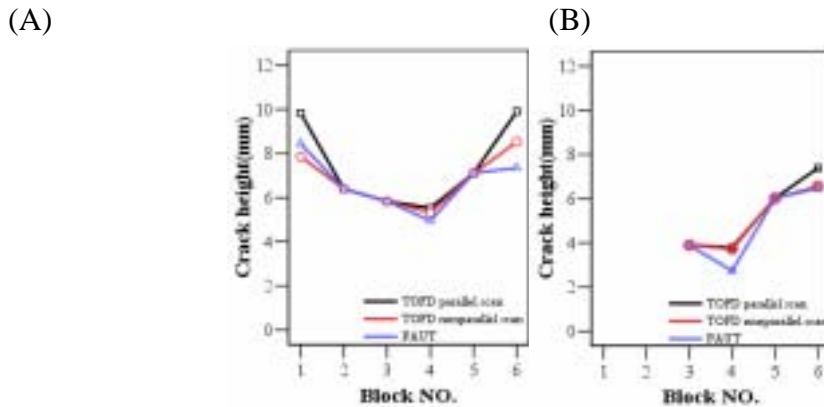
表三．自然裂紋縱向的深度

Block No.		TOFD 平行掃描	TOFD 非平行掃描	PAUT
第一片 試驗片	D 1	9.83	7.86	8.44
	2	6.39	6.39	6.39
	E 3	5.83	5.83	5.83
	4	5.53	5.32	4.95
	F 5	7.10	7.10	7.10
	6	9.90	8.52	7.35
第二片 試驗片	G 3	3.89	3.89	3.89
	4	3.80	3.72	2.73
	H 5	6.02	6.02	6.02
	6	7.39	6.56	6.47

單位：mm

綜合三種不同檢測方法的掃描方式，以飛行時間繞射檢測法平行掃描檢測最佳，以此掃描為主再配合另外兩種掃描，可以判斷內部自然裂紋的形狀，由圖十二所示。飛行時間繞射檢測法兩塊試驗片在 Block No.4 位置的掃描，平行掃描跟非平行掃描檢測出來的結果趨勢相同，裂紋近似於垂直形狀，第一塊 Block No.1 PAUT 檢測值優於非平行掃描，下尖端傾斜的角度很大，使得 TOFD 非平行掃描無法偵測到下尖端的裂紋，PAUT 可以偵測到傾斜裂紋又因下尖端反射信號波微弱，造成無法檢測最大的裂紋，TOFD 平行掃描有這兩項的優點可以準確檢測裂紋，第一塊 Block No.1 屬於下尖端傾斜角度比較大裂紋；第一塊 Block No.6 PAUT 只能檢測到 7.35 mm，TOFD 非平行掃描確可以檢測還比 PAUT 來的深，可能裂紋斷面呈現不規則的裂紋，因此造成檢測下尖端時提前反射，平行掃描跟非平行掃描檢測值還有 1.38 mm 的落差研判可能裂紋下尖端有輕微的傾斜，第一塊

Block No.6 屬於不規則傾斜裂紋；第二塊 Block No.6 TOFD 非平行掃描跟 PAUT 所檢測值很相近，與 TOFD 平行掃描的落差也不會有很大的差距，此裂紋屬於傾斜角度較小的裂紋。高階超音波檢測技術對於內部裂紋檢測的精密性：飛行時間繞射檢測法的平行掃描 > 飛行時間繞射檢測法的非平行掃描 > 相位陣列式超音波探檢測法。



圖十二. 高階超音波追蹤內部自然裂紋 (A).No.1 試驗片 (B)No.2 試驗片

五、結論

本研究將利用飛行時間繞射檢測法 (TOFD) 與相位陣列式超音波檢測法 (PAUT) 來評估內部自然裂紋的深度，並且追蹤鋼材內部縱向的自然裂紋差異，再以這三種超音波掃描的方式來判斷內部裂紋瑕疵的形狀。綜合以上的實驗結果，歸納後做出以下的結論。

1. 自然裂紋的深度都不一致而且斷面走向也沒有規則性，所以檢測時會受到斷面的角度、斷面的面積以及裂紋的高度等因素影響，因此量測時探頭必須擺動掃描或旋轉掃描才能確定音波有掃到最大的裂紋尖端，此時檢測值才為真正裂紋深度。
2. 飛行時間繞射檢測法的平行掃描與非平行掃描對於內部裂紋的檢測，當裂紋接近於垂直時，兩種檢測都有良好的檢測效果；由於裂紋的方向和角度無法掌握，當檢測

到傾斜裂紋時，傾斜的角度越大所造成的誤差就越大，所以非平行掃描只能當作初步的評估掃描，平行掃描先左右掃描找到裂紋，之後可在裂紋兩側擺動，因此不會受到裂紋傾斜的角度影響。

3. 相位陣列式超音波檢測法是利用反射波來檢測內部裂紋上下尖端，由於裂紋上下尖端反射回波信號太過於微弱，容易導致判讀所造成的誤差，所以不適合用來量測工件內部裂紋的深度。
4. 追蹤縱向裂紋的結果，飛行時間繞射檢測法的平行掃描呈現一個拋物線的形狀，其他兩種因裂紋傾斜的角度以及反射波不佳，導致追蹤的效果不好，所呈現較平拋物線的形狀。
5. 運用三種超音波技術方法對於內部裂紋檢測的精密度依序為：飛行時間繞射檢測法的平行掃描 > 飛行時間繞射檢測法的非平行掃描 > 相位陣列式超音波檢測法。
6. 飛行時間繞射法 (TOFD) 及相位陣列式超音波檢測法 (PAUT)，這兩種檢測方法是屬於高階超音波檢測技術，除了可應用在石化業、核能發電廠管線和壓力容器檢測外以及可應用在轉動的機械軸承與零件上，可以大大提升安全性與可靠性。

六、致謝

本文承蒙感謝台灣金屬材料品管有限公司黃啟貞先生、台灣中油鄭錦智工程師在實驗上的指導使得以完成本研究，特此感謝。

七、參考文獻

1. Doyle P. A., Scala C. M. Crack depth measurement by ultrasonics. *Ultrasonics* 1978: 164-170.
2. Domarkas V., Khuri Yakub B. T., Kino G. S. Length and Depth Resonances of Surface Cracks and Their Use for Crack Size Estimation. *Appl. Phys. Lett.* 1978; 33(7): 557-559.
3. Gilmora R. S., Czerw G. J. The Use of Radiation Field Theory to Determine the Size and Shape of Unknown Reflectors by Ultrasonic Spectroscopy. *Materials Evaluation* 1977: 44-50.
4. Gruber G. J. Defect Identification and Sizing by the Ultrasonic Satellite-Pulse Technique. *Journal of Nondestructive Evaluation* 1980; 1 (4): 263-276.
5. Harumi K., Uchida M., Miyajima T., Ogura Y. Defect sizing small inclined crack on a free surface using multi-tip waves. *NDT&E International* 1992; 25: 135-144.
6. J.P. Charlesworth, J.A.G. Temple. *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*, Research Studies Press LTD, 2002.
7. J. D. Achenbach, A. Norris, K. Viswanathan. Mapping of crack edges by seismic method. *Seismological Society of American* 1982; 72: 779-792.
8. Lloyd E. A. An Ultrasonic Shear-Wave Method for Measuring the Depth of Surface-Breaking Cracks. *British Journal of NDT* 1975: 172-175.
9. Lidington B. H., Silk M. G. Crack Depth Measurement Using a Single Surface Wave Probe. *Brit. J. NDT* 1975: 165-167.
10. Lidington B. H., Silk M. G. Interference effect in the reflection of ultrasound from shallow slits. *Non-Destructive Testing* 1975: 185-190.
11. Michael Berke, Krautkramer GmbH & Co., Hürth. *Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic*

Principles. The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics 2000; 5: 9.

12. N. Trimborn. The Time-of-Flight-Diffraction-Technique. The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics 1997; 2: 9.
13. P. Ciorau. Contribution to detection and sizing linear defects by conventional and phased array ultrasonic techniques. 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT 2004: 233.
14. R. Murugaiyan. Time of flight diffraction (TOFD), an advanced non-destructive testing technique for inspection of welds for heavy walled pressure vessels. 16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT 2004: 208.
15. Silk M.D. Sizing Crack-like Defects by Ultrasonic Wave. Ultrasonic Materials Characterization 1978: 29-36.
16. Silk M.G. The use of diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects. Brit. J. of NDT 1984; 26: 208-213.
17. Sony Baby, T. Balasubramanian, R.J. Pardikar. Sizing of cracks embedded in sub-cladding using ultrasonic synthetic aperture focusing technique (SAFT). _16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT 2004: 74.
18. Sony Baby, T. Balasubramanian, R.J. Pardikar. Ultrasonic sizing of embedded vertical cracks in ferritic steel welds. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2003; 40: 145-151.