

- Έλεγχος χυτών για να διαπιστωθεί η ομοιογένειά των.
- Έλεγχος σιδηρών τα οποία περιέχονται σε κατασκευές με μπετόν.
- Έλεγχος των συρμάτων που περιέχονται στα ελαστικά αυτοκινήτων.
- Έλεγχος της ομοιογένειας της εκρηκτικής ύλης σε οβίδες.

Πρόεδρος: Ευχαριστούμε το συνάδελφο Γαλατσάνο. Και θα ήθελα να καλέσω το συνάδελφο Τσιρώνη, διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό, καθηγητή της Σχολής Ικάρων.

Θα μας παρουσιάσει εισήγηση με θέμα: «Εφαρμογές υπερήχων για την εύρεση επιφανειακών ρωγμών με τη βοήθεια των κυμάτων Rayleigh».

Θέμα: Εφαρμογές υπερήχων για την εύρεση επιφανειακών ρωγμών με τη βοήθεια των κυμάτων Rayleigh.

Εισηγητής: Ι. Τσιρώνης, δρ ΜΜ, καθηγητής Σχολής Ικάρων.

Συμβολισμοί

A_R συντελεστής ανακλάσεως
 A_T συντελεστής μεταδόσεως
 c ταχύτητα μετάδοσης κυμάτων στο εξεταζόμενο υλικό (με δείκτες L, R, T)
 d μήκος ρωγμής
 f συχνότητα
 L διαμήκη κύματα
 R κύματα Rayleigh
 T εγκάρσια κύματα
 λ μήκος κύματος $\lambda = c/f$
 ν λόγος Poisson

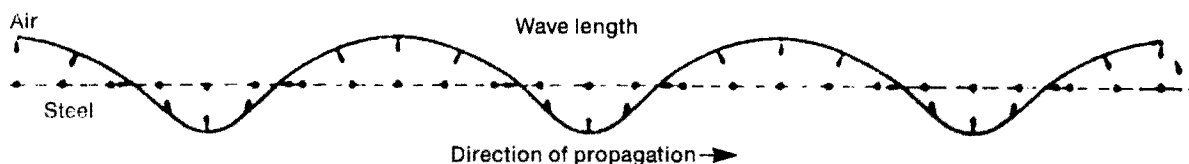
1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η εφαρμογή των συγχρόνων μεθόδων σχεδιασμού, συντήρησης και επέκτασης της ζωής των κατασκευών εξαρτάται από την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων ποσοτικού μη καταστροφικού ελέγχου και αξιολόγησης (QNDE: Quantitative Non-Destructive Evaluation Methods) [1, 9, 14, 18, 19, 22]. Η εξέταση με υπερήχους είναι μια κατάλληλη μέθοδος ποσοτικής αξιολόγησης των ατελειών του υλικού, και ειδικότερα των ρωγμών. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση της μελέτης της ατομικής και της απομένουσας ζωής του στοιχείου με

βάση τις μεθόδους της Μηχανικής Θραύσης και της θεωρίας της Κόπωσης.

Κατά την εξέταση ενός υλικού με υπερήχους, ο σκοπός είναι να βρεθεί το μήκος της ρωγμής, ο προσανατολισμός και το σχήμα της και τελικά το βάθος της ρωγμής κάτω από την επιφάνεια του υλικού, το οποίο φυσικά δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζεται με το μήκος της στην περίπτωση μη καθέτων στην επιφάνεια ρωγμών [2, 4, 10, 20]. Ένα χρήσιμο μέγεθος γι' αυτό το σκοπό, πέρα από τις κλασικές μεθόδους μέτρησης του χρόνου διαδρομής του κύματος, είναι ο ποσοτικός χαρακτηρισμός της ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ανακλάσεως αυτής. Το πρόβλημα αυτό, πολλές φορές καλούμενο ως το «αντίστροφο πρόβλημα», έχει ήδη βρει εφαρμογή στα radars και sonars, και ήδη χρησιμοποιείται στο μη καταστροφικό έλεγχο [17, 21].

Η χρησιμοποίηση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh για την εξέταση ρωγμών με υπερήχους είναι ιδιαίτερα ελκυστική. Αυτά έχουν την ιδιότητα να διεισδύουν ελάχιστα μέσα στο υλικό (περίπου 1,5 μήκη κύματος) και να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς αξιόλογη μείωση του πλάτους τους και διάχυση της ενέργειάς τους. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός της αξιοποίησης των κυμάτων Rayleigh για το



Σχήμα 1. Επιφανειακά κύματα σε χάλυβα. Έλλειψη ταλάντωσης ενός στοιχειώδους σωματιδίου και φορά περιστροφής του.

χαρακτηρισμό των σεισμών, αφού δύνανται να μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις και γίνονται αντιληπτά σε πολύ απομακρυσμένους σταθμούς καταγραφής. Επομένως, είναι ιδιαίτερος κατάλληλα για την ποσοτική αξιολόγηση επιφανειακών ρωγμών, οι οποίες κυρίως συναντώνται κατά την κόπωση των υλικών.

Η παρούσα εργασία εκθέτει μερικές βασικές ιδιότητες των κυμάτων Rayleigh καθώς και τις μεθόδους μη καταστροφικής αξιολόγησης με αυτά.

2. Φύση και παραγωγή των κυμάτων Rayleigh

Ο λόρδος Rayleigh (1885) ήταν ο πρώτος που έλυσε το ελαστοδυναμικό πρόβλημα που χαρακτηρίζει τη μετάδοση των επιφανειακών κυμάτων, λύνοντας τις εξισώσεις κινήσεως με τις οριακές συνθήκες που επιβάλλονται από την επιφάνεια [5, 17, 23]. Η ταχύτητα c_R των κυμάτων Rayleigh εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα των χωρικών (bulk ή body) κυμάτων, δηλαδή την ταχύτητα c_L των διαμήκων (longitudinal) και c_T των εγκάρσιων κυμάτων (transverse ή shear) στο συγκεκριμένο υλικό και συνεπώς από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Συνήθως προσεγγίζεται από την σχέση: [8]

$$c_R = (0.87 + 1.12\nu) / (1 + \nu) c_T \quad (1)$$

Ο πίνακας 1 δίνει την ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων συναρτήσει του λόγου Poisson ν . Παρατηρήσατε την εγγύτητα των τιμών της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων και των κυμάτων Rayleigh, γεγονός που κάνει μερικές φορές τη διάκριση μεταξύ τους δύσκολη. Τα πολύ ταχύτερα διαμήκη κύματα συνήθως αποχωρίζονται γρήγορα από το συγκρότημα των ανακλωμένων ή μεταδιδόμενων κυμάτων άλλης φύσεως, εφόσον ο μεταλλάκτης (transducer) βρίσκεται επαρκώς μακριά από την εξεταζόμενη ρωγμή.

Πίνακας 1. Ταχύτητες μετάδοσης ελαστικών κυμάτων συναρτήσει του λόγου Poisson [9].

| ν | c_T/c_L | c_R/c_T |
|-------|-----------|-----------|
| 0.00 | 0.707 | 0.862 |
| 0.25 | 0.577 | 0.919 |
| 0.33 | 0.500 | 0.932 |
| 0.40 | 0.408 | 0.941 |
| 0.50 | 0.000 | 0.955 |

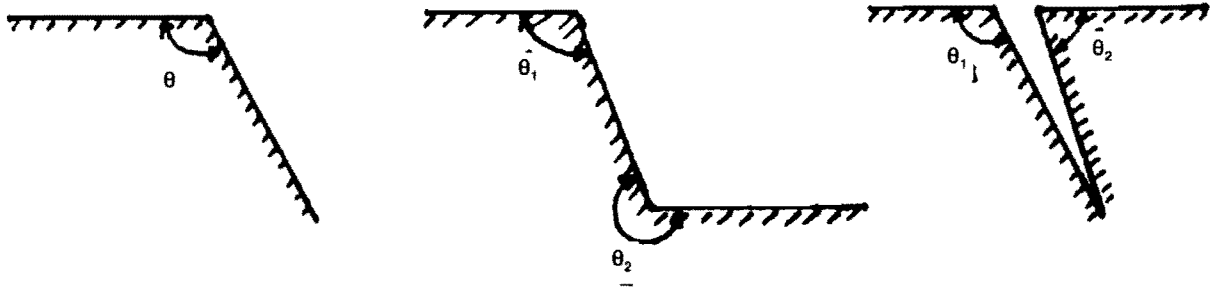
Η κίνηση των σωματιδίων του υλικού στην επιφάνεια

του αποτελείται από ημιτονοειδείς και συνημιτονοειδείς κινήσεις σε ορθές γωνίες μεταξύ τους, και έχει ελλειπτική τροχιά (σχήμα 1, [14]). Το σύνολο της ενέργειας του κύματος περιέχεται σε ένα στρώμα πάχους 1 έως 2 μήκη κύματος από την επιφάνεια και είναι αυτό ακριβώς το γεγονός που κάνει τα κύματα Rayleigh ελαστικά για τον έλεγχο ανωμαλιών κοντά στην επιφάνεια. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των κυμάτων Rayleigh, είναι η μετατροπή τους (mode conversion) σε διαμήκη και εγκάρσια κύματα κατά την πρόσκρουσή τους σε ανωμαλίες του υλικού, τα οποία είναι πιθανόν να επανασυνδυσασθούν και να δημιουργήσουν νέα κύματα Rayleigh [15].

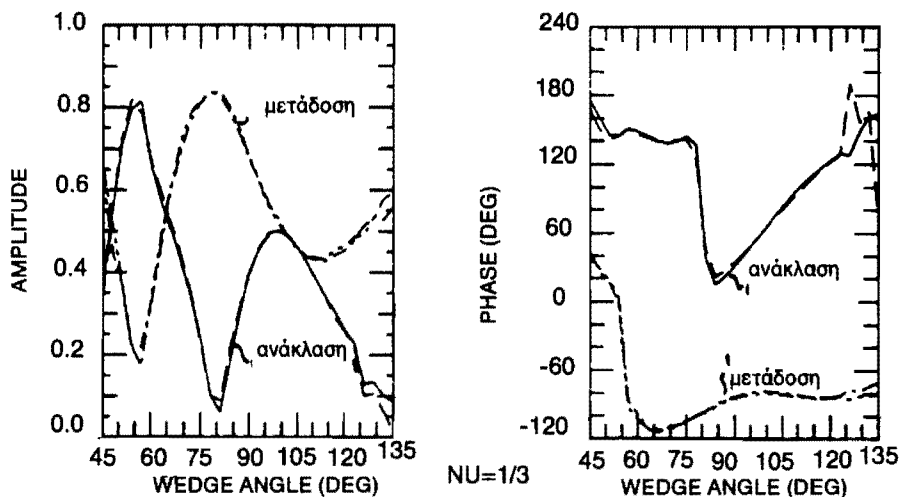
Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραγωγής κυμάτων Rayleigh είναι η λεγόμενη σφηνοειδής ή πρισματική, η οποία βασίζεται στη μετατροπή των διαμήκων κυμάτων σε κύματα Rayleigh, όταν αυτά συναντήσουν την επιφάνεια του υλικού υπό μια ορισμένη γωνία [3, 12, 23]. Κατ' αυτήν τη μέθοδο μια πιεζοηλεκτρική πλάκα ευρίσκεται επί της κεκλιμένης επιφάνειας πλαστικού πρίσματος, του οποίου η κλίση ως προς την επιφάνεια του σώματος δίνεται από τη σχέση: όπου ο δείκτης «w» αναφέρεται στο πλαστικό υλικό του πρίσματος και ο δείκτης «R» στο υλικό του υπό εξέταση σώματος. Επιπροσθέτως θα πρέπει $c_w < c_R$ (2). Να σημειωθεί ότι όπως προκύπτει από τη σχέση (2), οι διατιθέμενοι στο εμπόριο πιεζοηλεκτρικοί μεταλλάκτες (transducers) που είναι κατάλληλοι για τον έλεγχο ενός υλικού, δεν είναι απαραίτητως κατάλληλοι και για άλλα υλικά, αφού η ταχύτητα c_R σε αυτά θα είναι διαφορετική. Πάντως, οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι πιεζοηλεκτρικοί ελεγκτές για τον έλεγχο χαλυβδίνων κατασκευών (λόγος Poisson: $\nu=0.25$) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για αλουμίνιο ($\nu=0.33$).

3. Αλληλεπίδραση των κυμάτων Rayleigh με επιφανειακές ανωμαλίες (scattering phenomena)

Τα κύματα Rayleigh που χρησιμοποιούνται στο μη καταστροφικό έλεγχο πρέπει να έχουν μήκη κύματος συγκρίσιμα με το αναμενόμενο μήκος της ρωγμής. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται μια προσεκτική εκτίμηση της κλίμακας του προβλήματος. Γενικά, είναι χρήσιμη η εκτίμηση του μεγέθους d/λ , το οποίο για πρακτικές εφαρμογές πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 5. Αυτό σημαίνει ότι για μήκος ρωγμής από 0.5mm μέχρι ολίγων mm, οι συχνότητες ελέγχου κυμαίνονται στην περιοχή 0.2 KHz μέχρι 10MHz (πρβλ: $c=\lambda \cdot f$). Εξέταση με υψηλότερες συχνότητες θα προκαλέσει τα γνωστά προβλήματα διάχυσης της ενέργειας του κύματος, του οποίου το μήκος κύματος θα είναι πλέον της τάξεως μεγέθους των κόκκων του υλικού και της πι-



Σχήμα 2. Σχηματική παράσταση ιδανικοποιημένων γωνιών, βαθμίδων και εγκοπών (ρωγμών).



Σχήμα 3. Πλάτος και γωνία φάσης των συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης συναρτήσει της γωνίας για λόγο Poisson $\nu=1/3$ [7].

θανής ταχύτητας της επιφάνειας του υλικού και της ρωγμής. Γενικά το φαινόμενο της διάχυσης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ της ποσότητας (μέγεθος κόκκου ή επιφανειακής τραχύτητας) και του μήκους κύματος. Αν το μέγεθος κόκκου ή η μέση τραχύτητα είναι μικρότερη από 0.01 μήκη κύματος, δεν υπάρχει διάχυση, ενώ για μεγέθη τραχύτητας πάνω από 0.1 μήκη κύματος ο πρακτικός έλεγχος είναι αδύνατος [23]. Παρ' όλα αυτά, συχνότητες ελέγχου μέχρι 100MHz ήδη χρησιμοποιούνται για μη συμβατικές εμπορικές εφαρμογές, ιδίως για έλεγχο σύνθετων και συνθετικών υλικών (οπτικό μικροσκόπιο).

Δυστυχώς, δεν υπάρχει αναλυτική λύση για το φαινόμενο του διασκορπισμού (scattering) ενός προσπίπτοντος κύματος επί μιας επιφανειακής ανωμαλίας (το καλούμενο «ευθύ πρόβλημα»), παρά μόνο για πολύ απλές περιπτώσεις [11, 17]. Ιστορικά και κατά σειρά αύξουσας δυσκολίας τα σχήματα επιφανειακών ανωμαλιών που τράβηξαν το ενδιαφέρον των ερευνητών ήσαν οι γωνίες, οι βαθμίδες και οι εγκοπές (σχήμα 2). Να σημειωθεί ότι όλα αυτά τα ιδανικοποιημένα σχήματα έχουν «καθαρές» επιφάνειες και παρείες ρωγμών, χωρίς την αναπόφευκτη τραχύτητα των

πραγματικών ομολόγων τους. Όταν ένα επιφανειακό κύμα συναντήσει μια γωνία, ή μια εγκοπή, μέρος της ενέργειάς του ανακλάται σαν επίσης επιφανειακό κύμα, μέρος αυτής μεταδίδεται πέρα από τη γωνία ή εγκοπή και μέρος της διαχέεται στον όγκο του υλικού με τη μορφή χωρικών κυμάτων. Περαιτέρω δυσκολία εμφανίζεται κατά την περίπτωση που το υπό εξέταση σώμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ημιχώρος, αλλά περιέχει πρόσθετες εξωτερικές επιφάνειες στις οποίες τα χωρικά κύματα δύνανται να ανακλασθούν και να επανασυγκολληθούν με τη μορφή επιστροφόντων επιφανειακών κυμάτων [15].

Γενικά τρεις περιπτώσεις μπορούν να διακριθούν κατά την πρόσκρουση ενός κύματος Rayleigh με μια γωνία ή εγκοπή, αναλόγως του σχετικού μεγέθους του μήκους κύματος και μιας χαρακτηριστικής διάστασης της επιφανειακής ανωμαλίας:

α) Όταν $d \ll \lambda$ (δηλ. υψηλές συχνότητες ελέγχου), τότε το κύμα Rayleigh ακολουθεί τις ομαλές γωνίες της επιφανειακής ανωμαλίας και διασκορπίζεται μόνο σε μύτερες γωνίες. Εδώ μπορεί να υποθεθεί ότι το κύμα αντιδρά με κάθε μύτερη γωνία ξεχωριστά και αποκτά την ασυμπτωτική του μορφή μεταξύ αυτών των αντι-

δράσεων. Η περίπτωση θα ήταν ιδανική για NDE αν δεν υπήρχαν τα προβλήματα του ελέγχου με υψηλές συχνότητες, κατά τα οποία το μήκος κύματος γίνεται της τάξεως μεγέθους του κόκκου του υλικού και της τραχύτητας επιφανείας.

β) Όταν $d \gg \lambda$, (χαμηλές συχνότητες ελέγχου), τότε το κύμα Rayleigh δεν παρεκκλίνει πολύ από την πορεία του και μεταδίδεται σχεδόν ανενόχλητο αγνοώντας την ανωμαλία. Η ανωμαλία αντιμετωπίζεται από αυτό σαν να ήταν μια αμελητέα τραχύτητα της επιφανείας.

γ) Όταν $d \approx \lambda$, τότε η αλληλεπίδραση είναι πολύ συγκεχυμένη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πάντως, αυτή είναι η περίπτωση που συνήθως παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον για το NDE, και γι' αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της σχέσης d/λ και συντελεστού ανακλάσεως της επιφανειακής ανωμαλίας (βλέπε και παρακάτω στο τμήμα 4.2.).

Στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικά στοιχεία της διάχυσης των προσπιπόντων κυμάτων Rayleigh μετά από πρόσκρουση σε στοιχειώδη επιφανειακά σχήματα.

3.1. Επίδραση των γωνιών

Εδώ οι πλευρές της γωνίας θεωρούνται ως εκτεινόμενες σε άπειρο μήκος εκατέρωθεν της ακμής της. Προφανώς τώρα δεν υπάρχει χαρακτηριστικό μήκος στο πρόβλημα, και οι συντελεστές ανακλάσεως και μεταδόσεως είναι ανεξάρτητοι του μήκους κύματος και συνεπώς της συχνότητας [7, 16, 23]. Οι τιμές του A_R κυμαίνονται συναρτήσει της τιμής της γωνίας (σχήμα 3, [7]) και καθώς η γωνία προσεγγίζει τις 180° ο συντελεστής ανακλάσεως γίνεται 0 και ο συντελεστής μεταδόσεως 1, όπως είναι λογικό.

Ειδικά για τη γωνία 90° (τεταρτημόριο), ο συντελεστής ανακλάσεως A_R είναι περίπου 0.35 για $\nu=0.25$ (χάλυβας) ή περίπου 0.40 για $\nu=0.33$ (αλουμίνιο). Ο αντίστοιχος συντελεστής μεταδόσεως A_T είναι 0.68 για $\nu=0.25$ και 0.60 για $\nu=0.33$. Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα βγαίνει από τη διαπίστωση ότι η μεταφερομένη ενέργεια ενός ανακλωμένου ή μεταδιδομένου κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του συντελεστή ανάκλασης ή μετάδοσης, αντίστοιχα. Για τεταρτημόριο η σχέση $\gamma=1-A_R^2-A_T^2$ είναι 0.43-0.50. Αυτό σημαίνει ότι όταν ένα κύμα Rayleigh αντιδρά με ένα τεταρτημόριο, περίπου μισή από την ενέργειά του ακτινοβολεί με τη μορφή χωρικών κυμάτων και η υπόλοιπη μεταδίδεται και ανακλάται ως κύματα Rayleigh. Το συμπέρασμα μπορεί να είναι χρήσιμο για τη ρύθμιση (calibration) των οργάνων ως προς την απαιτούμενη ισχύ στις πρακτικές εφαρμογές.

3.2. Επίδραση των βαθμίδων και εγκοπών

Στις βαθμίδες υπάρχει το επιπλέον χαρακτηριστικό μέγεθος d , και ισχύουν οι γενικές διαπιστώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όταν ο λόγος d/λ είναι μικρός, τότε η περίπτωση αποτελεί μια μικρά παρέκκλιση από τη γεωμετρία του ημιχώρου. Όταν ο $d/\lambda \approx 1$, τότε το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία-δια-

φορές) ή πειραματικά, αλλά η έκθεσή του ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της σύντομης εισαγωγής.

Όταν d/λ είναι μεγάλο, τότε το προσπίπτον κύμα αντιδρά πρώτα με την άνω ακμή (πρώτο χείλος) της βαθμίδας και στη συνέχεια με την κάτω. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει χρήση της τεχνικής των πολλαπλών διασκορπίσεων. Έτσι, για παράδειγμα, για μια βαθμίδα $90^\circ+270^\circ$ ο συντελεστής ανακλάσεως αποτελείται από τις εξής συνεισφορές, για αλουμίνιο (οι ενδεικτικές τιμές των A_R και A_T ελήφθησαν από Gautessen (1987):

1. ανάκλαση από την πρώτη 90° γωνία (πρώτο χείλος)0.4
2. μετάδοση μετά την πρώτη 90° γωνία - (ταξίδι μέχρι τη δεύτερη 90° γωνία επί της παρειάς) - ανάκλαση από τη δεύτερη 270° γωνία (δεύτερη ακμή της βαθμίδας) - (επιστροφή πίσω στην πρώτη 90° γωνία επί της παρειάς) - μετάδοση μετά την πρώτη 90° γωνία..... $0.6 \times 0.08 \times 0.6 = 0.03$ (υπενθυμίζεται ότι ανάκλαση συμβαίνει μόνο σε μύτερες γωνίες, αλλιώς το κύμα ταξιδεύει αμείωτο).

Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ανακλάσεως ταλαντούται γύρω από την τιμή 0.4 και το ημιπλάτος της ταλάντωσης είναι 0.03.

Ο αντίστοιχος συντελεστής μετάδοσης θα αποτελείται από τις συνεισφορές:

1. μετάδοση μετά την πρώτη 90° γωνία - (ταξίδι μέχρι τη δεύτερη 270° γωνία) - μετάδοση μετά τη δεύτερη 270° γωνία..... $0.6 \times 0.27 = 0.16$
2. μετάδοση μετά την πρώτη 90° γωνία - (ταξίδι μέχρι τη δεύτερη 270° γωνία) - ανάκλαση στη δεύτερη 270° γωνία - (ταξίδι πίσω στην πρώτη 90° γωνία) - ανάκλαση στην πρώτη 90° γωνία - (ταξίδι μέχρι τη δεύτερη 270° γωνία) - μετάδοση μετά τη δεύτερη 270° γωνία... $0.6 \times 0.08 \times 0.4 \times 0.6 = 0.01$.

Το προφανές συμπέρασμα εκ των ανωτέρω είναι ότι η επίδραση της πρώτης γωνίας της βαθμίδας είναι το κυρίαρχο γεγονός στην αλληλεπίδραση των κυμάτων Rayleigh με τη βαθμίδα, εφόσον η εξέταση γίνεται με υψηλές συχνότητες. Παρόμοια γεγονότα όπως για τις βαθμίδες ισχύουν και για τις εγκοπές (ιδανικοποιημένες ρωγμές). Ας σημειωθεί ότι η πλευρά της εγκοπής που το κύμα συναντά μετά το μύτερο άκρο της ρωγμής δεν φαίνεται να επηρεάζει έντονα την ανάκλαση, όπως υπονοείται από την παραπάνω απλοποιημένη ανάλυση.

Ειδικά για την περίπτωση που $d/\lambda > 1$, φασματικές τεχνικές μπορούν χρησιμοποιηθούν με επιτυχία. Κατ' αυτές μετράται η απόσταση μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων στο φάσμα συχνοτήτων. Το χαρακτηριστικό μήκος d της βαθμίδας ή ρωγμής συνδέεται με τη μέση απόσταση μεταξύ των μεγίστων ή ελαχίστων του φάσματος συχνοτήτων Δf με την απλή σχέση [10, 13, 15 και σχήμα 10]:

$$\Delta f d = \frac{c_R}{2} \quad (3)$$

ή:

$$\Delta (k d) = \pi \quad (4)$$

όπου k είναι ο κυματαριθμός (wavenumber): $k=2\pi f/c_R$. Καθώς οι ταλαντώσεις έχουν περιοδικότητα τέτοια ώστε μισό μήκος κύματος αντιστοιχεί στο μήκος d , αυτές μπορούν να αποδοθούν στις καταστροφικές και εποικοδομητικές αλληλεπιδράσεις των κυμάτων Rayleigh που δημιουργούνται στο χείλος και τη μύτη της ρωγμής. Το σήμα είναι μέγιστο σε μήκη ρωγμής ίσα με μονό αριθμό μισών μηκών κύματος και ελάχιστο για μήκη ρωγμής ίσα με ζυγό αριθμό μηκών κύματος.

4. Πειραματικές τεχνικές

4.1. Μετρήσεις του χρόνου αφίξεως του σήματος

Μια τυπική διάταξη πειραματικού συστήματος φαίνεται στο σχήμα 4. Σημειώσατε το μετατροπέα του αναλογικού σήματος του παλμογράφου σε ψηφιακό, ώστε το σήμα να χρησιμοποιηθεί και για φασματική ανάλυση.

Τα γνωστά προβλήματα που αναφύονται στις μετρήσεις επαφής με χρήση υγρού συζεύξεως (couplant) εμφανίζονται φυσικά και κατά τις μετρήσεις των κυμάτων Rayleigh. Πάντως, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, που οφείλεται κυρίως στο μη ομοιόμορφο πάχος του film του υγρού, βελτιώνεται θεαματικά με τη χρήση μεθόδων μη επαφής, όπως οι μεταλλάκτες laser. Επίσης, τα προβλήματα μπορούν να εξαλειφθούν τελείως αν οι μετρήσεις γίνουν σε δεξαμενή υγρού, όπου τα διεγερόμενα επιφανειακά κύματα ονομάζονται κύματα Lamb, των οποίων η μελέτη όμως είναι εκτός των σκοπών αυτών της εργασίας.

Η εξέταση μπορεί να γίνει με ένα ή δύο πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους (probes). Ο αναγνώστης υποτίθεται ότι έχει κάποια πείρα σχετικά με τη θέση τοποθέτησης των κρυστάλλων, σχετικά με την υποτιθέμενη θέση της ρωγμής, ώστε αυτή να μη βρίσκεται στο εγγύς πεδίο του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Αυτό σημαίνει ότι η εκπεμπόμενη δέσμη πρέπει να έχει ήδη αποκτήσει τις ιδιότητες του σχετικά ομοιόμορφου πεδίου (far-field conditions). Στη μέθοδο με έναν κρύσταλλο (pulse-echo) (σχήμα 5) είναι δυνατόν, εφόσον η συχνότητα εξετάσεως είναι υψηλή (μεγάλος λόγος d/λ), να διακρίνουμε στο ανακλώμενο σήμα τα κύματα Rayleigh που ανακλώνται από μεμονωμένα στοιχεία της ρωγμής (χείλη, άκρο και πιθανώς από άλλα μωτερά σημεία μιας ακανόνιστης ρωγμής).

Στην εξέταση με δύο κρυστάλλους (transmission method ή pitch-catch) του σχήματος 6, η διαφορά του χρόνου αφίξεως του κύματος σε μια διαδρομή χωρίς ρωγμή και στην ίδια διαδρομή όπου παρεμβάλλεται ρωγμή, επιτρέπει τη μέτρηση του μήκους της ρωγμής. Πάντως, η μέτρηση είναι δυσκολότερη σε αυτή την περίπτωση, γιατί το κύμα που «περιρρέει» τη ρωγμή υφίσταται πολλαπλές διασκορπίσεις (πρώτο χείλος-ακμή-δεύτερο χείλος) και η ενέργεια που φτάνει στο δέκτη είναι πολύ μικρή. Επιπλέον, δημιουργούνται και άλλοι τύποι κυμάτων που πιθανόν να δυσχεράνουν την αναγνώριση των κυμάτων Rayleigh. Επίσης, τα προβλήματα με το υγρό συζεύξεως είναι εντονότερα, αφού τώρα υπάρχουν 2 κρύσταλλοι.

Αν υπάρχουν και άλλες επιφάνειες στο εξεταζόμενο σώμα, τότε μπορεί να γίνει χρήση του φαινομένου της αλλαγής μορφής των κυμάτων Rayleigh (mode conversion) σε σημεία διάχυσης, εφόσον και πάλι ισχύει $d/\lambda > 1$. Το κύμα Rayleigh που ταξιδεύει κάτω στην πρώτη πλευρά της ρωγμής, του σχήματος 7, μετατρέπεται σε διαμήκες κύμα στο άκρο της ρωγμής, ταξιδεύει στον όγκο του σώματος έως την κάτω επιφάνειά του όπου ανακλάται και ακολουθεί την ίδια διαδρομή επιστροφής. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της πρώτης επιστροφής κύματος Rayleigh από την πρώτη ανάκλαση στο χείλος της ρωγμής και του κύματος Rayleigh που ακολούθησε την πορεία του σχήματος 7, είναι:

$$\Delta T = \frac{2d}{c_R} + \frac{2(t-d)}{c_T} \quad (5)$$

4.2. Μετρήσεις στο χώρο συχνοτήτων (frequency domain)

Όταν ο λόγος $d/\lambda \approx 1$ τότε τα διάφορα σήματα που επιστρέφουν στο μεταλλάκτη από τη ρωγμή επικαλύπτονται. Είναι συνεπώς δύσκολο να διακριθούν τα μεμονωμένα σήματα από το χείλος ή το άκρο της ρωγμής, τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στον ποσοτικό χαρακτηρισμό της. Αυτά τα σήματα είναι τόσο «συνωστισμένα» στη χρονική κλίμακα του παλμογράφου, που δεν διακρίνεται εύκολα από που προέρχεται το καθένα. Γι' αυτό το λόγο η μεταφορά του σήματος στο χώρο συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό με τη μελέτη του φάσματός του. Έτσι λαμβάνεται ο συντελεστής A_R ή A_T της ρωγμής, για ένα σύνολο τιμών του λόγου d/λ , που αντιστοιχεί στην ευρεία κλίμακα συχνοτήτων των συγχρόνων μεταλλακτών (broadband transducers). Επίσης μπορεί να γίνει χρήση της σχέσης (3) ή (4) για το χαρακτηρισμό της ρωγμής.

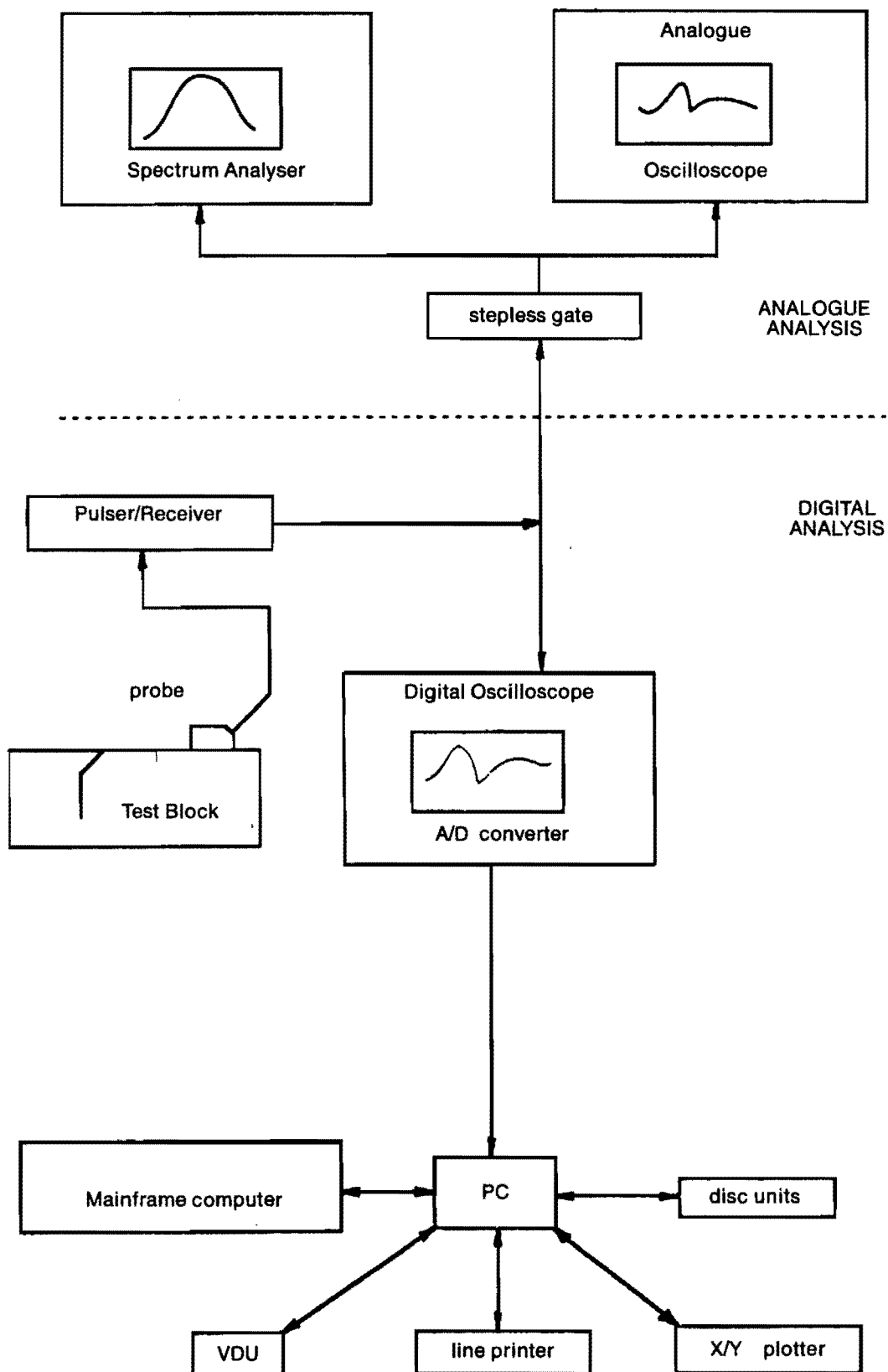
Η διαδικασία έχει σαν σκοπό να αφαιρέσει (deconvolve) από το φάσμα που προέρχεται από τη ρωγμή την επίδραση του συστήματος μετρήσεως. Περιληπτικά τα βήματα για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι:

α) Το σήμα που προέρχεται αποκλειστικά από τη ρωγμή απομονώνεται (gated) και ανευρίσκεται το φάσμα (spectrum) του $V_1(f)$ στο χώρο συχνοτήτων με χρήση του ταχέως μετασχηματισμού Fourier [(FFT: Fast Fourier Transform) (σχήματα 8, 9)]. Η μετατροπή γίνεται εύκολα με απλά προγράμματα Η/Υ, εφόσον βεβαίως το σήμα έχει ήδη μετατραπεί σε ψηφιακό.

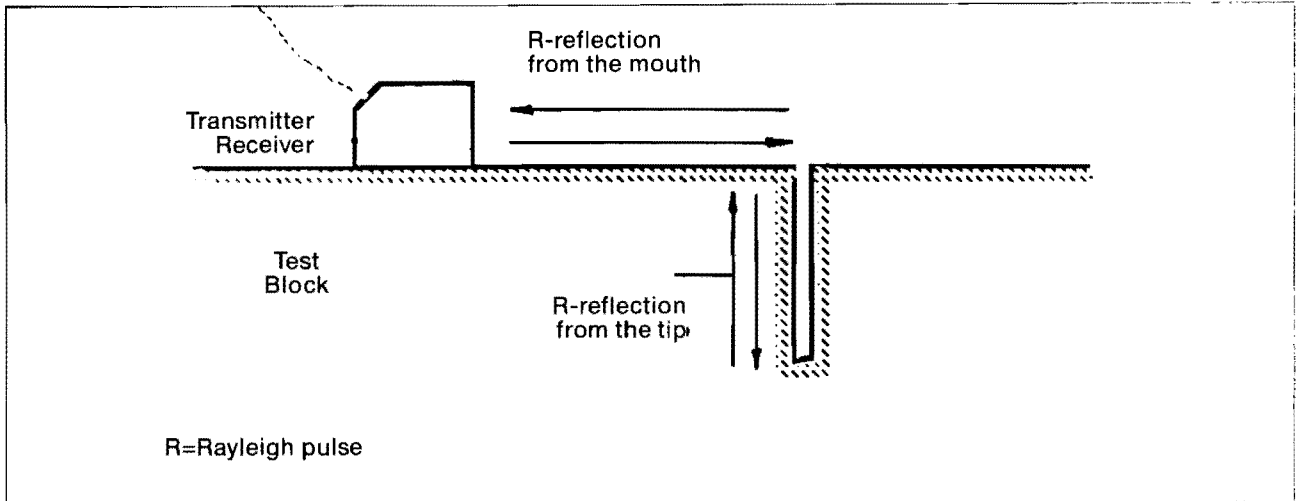
β) Λαμβάνεται κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο ένα σήμα αναφοράς από ένα γνωστό σχήμα, όπως π.χ. από μια ορθή γωνία. Το φάσμα αυτού του σήματος $V_2(f)$ θα συνδέεται με το προσπίπτον σήμα που προκαλείται από το μεταλλάκτη $I(f)$, από την παρακάτω σχέση που προκύπτει ευθέως από τον ορισμό του συντελεστή ανάκλασης:

$$V_2(f) = A_R \times I(f) \quad (6)$$

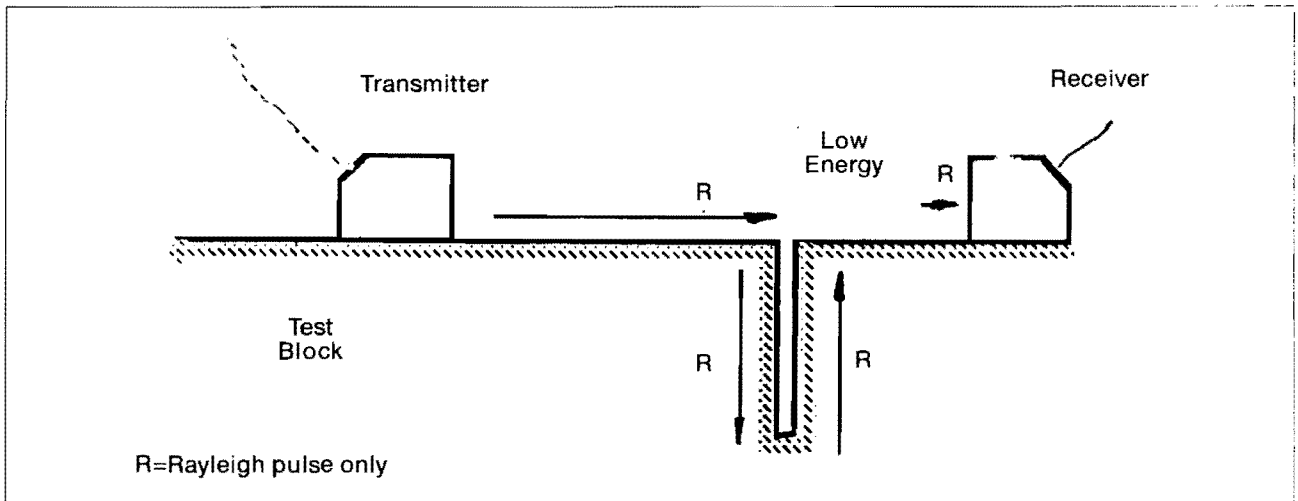
γ) Η απόλυτη τιμή του συντελεστή ανάκλασης της ρωγμής προκύπτει πλέον από τη σχέση (βλ. και σχή-



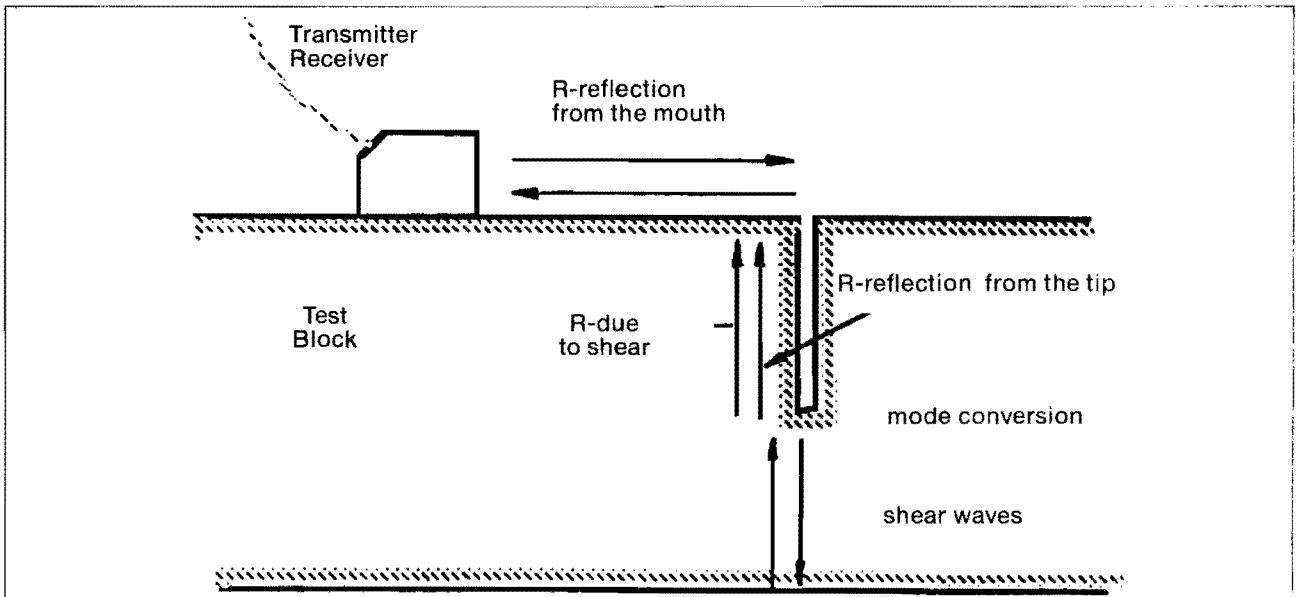
Σχήμα 4. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης για μετρήσεις χρόνου αφίξεως και για υπερηχητική φασματοσκοπία.



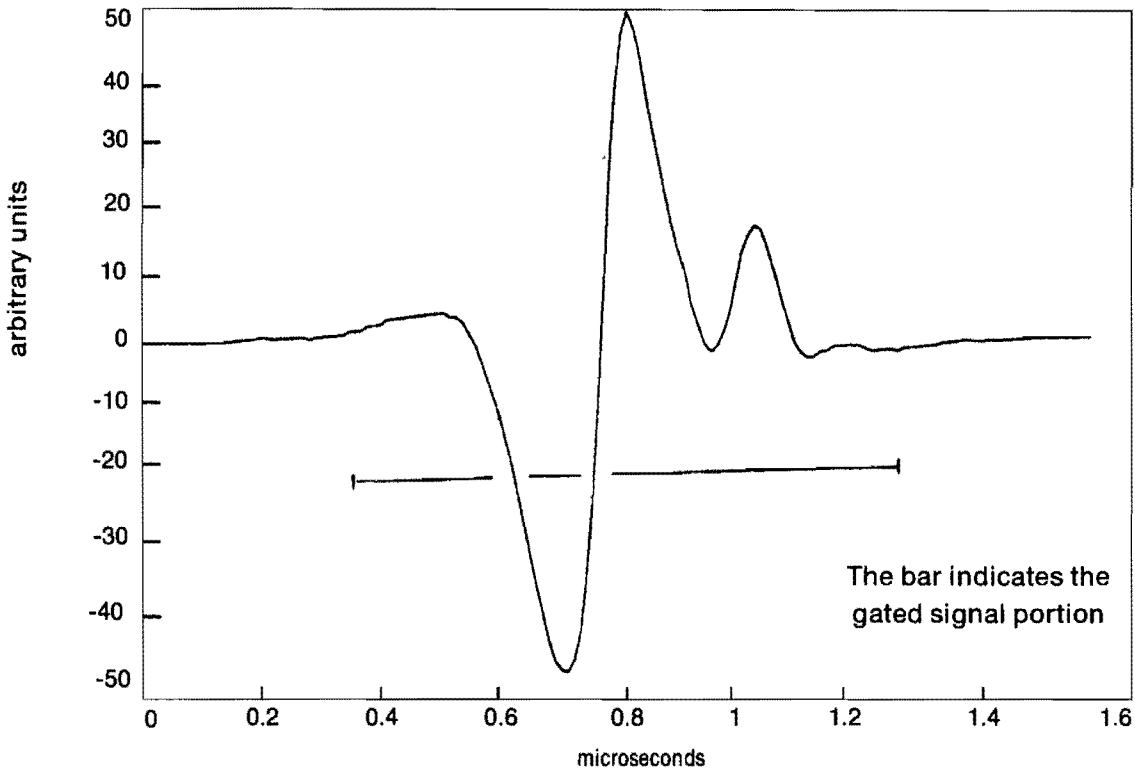
Σχήμα 5. Μέθοδος μέτρησης με ένα μεταλλάκτη (pulse-echo).



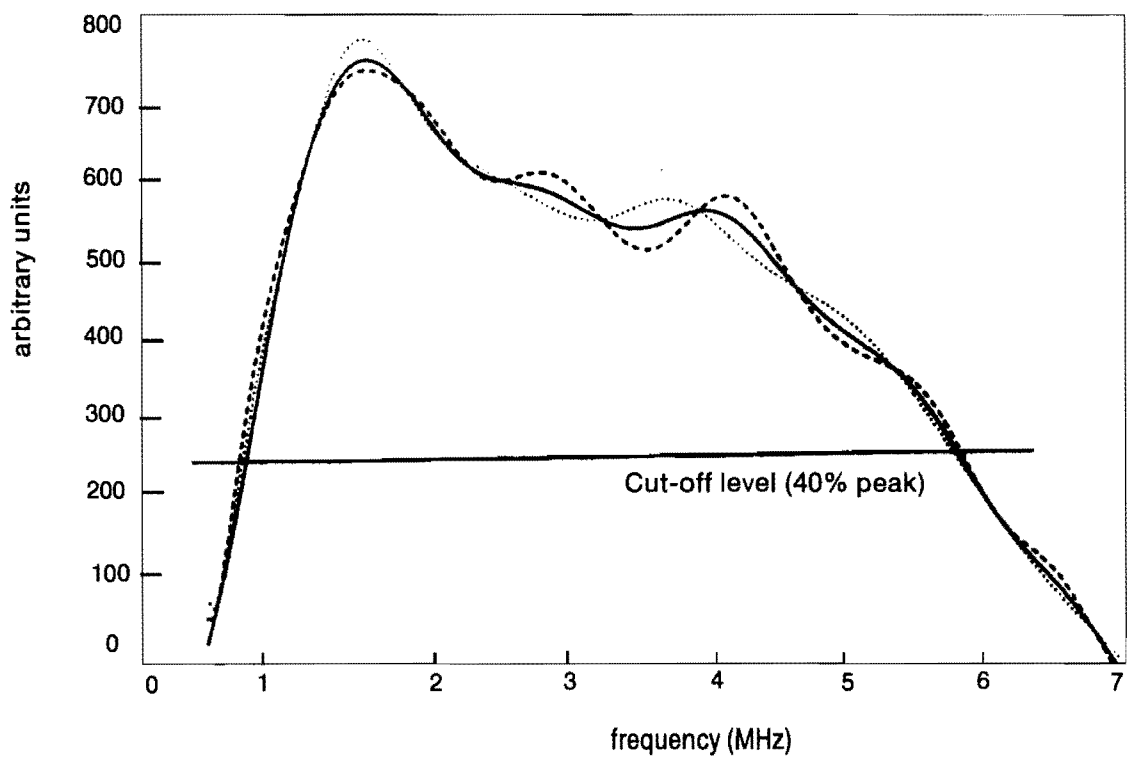
Σχήμα 6. Μέθοδος μέτρησης, με μέτρηση του χρόνου μετάδοσης των κυμάτων Rayleigh (pitch-catch).



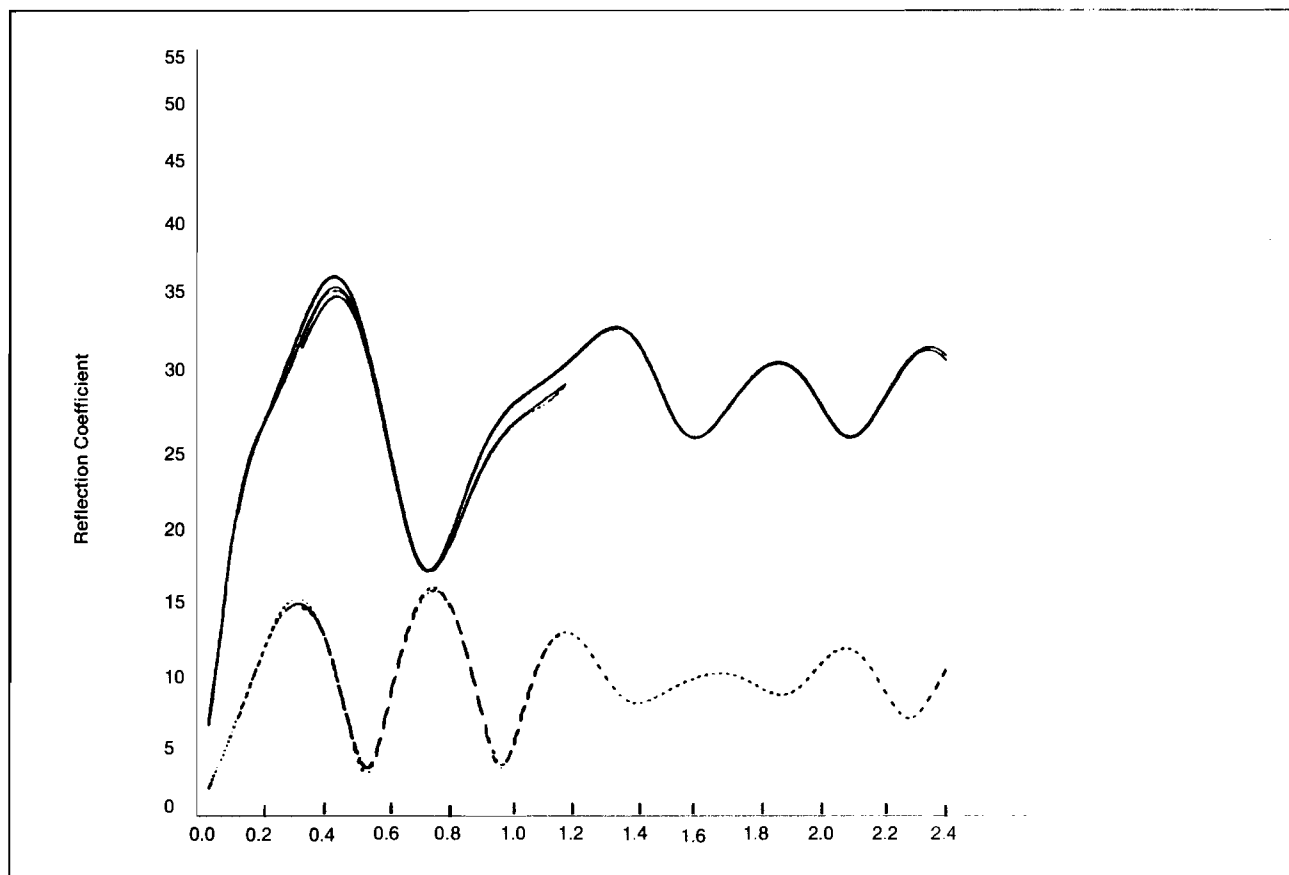
Σχήμα 7. Μετατροπή κυμάτων σε άλλες μορφές (mode conversion) σε μια πλάκα [10].



Σχήμα 8. Αποκοπέν (gated) χρονικό σήμα προερχόμενο από μία γωνία 90°.



Σχήμα 9. Φάσμα του παραπάνω σήματος. Το ύψος αποκοπής έχει τεθεί στο 40% της μεγίστης τιμής του (πρακτικώς χρησιμοποιούμενες συχνότητες από 1-6 MHz).



Σχήμα 10. Συντελεστής ανάκλασης για κάθετη και κεκλιμένη κατά 135° βαθμίδα σε χάλυβα.

μα 10):

$$R(f) = \frac{V_1(f)}{I(f)} - \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \times A_R \quad (7)$$

Η απλοποιημένη αυτή ανάλυση δεν κάνει χρήση φίλτρων ή διαδικασιών παραθύρωσης (windowing). Πάντως, είναι καλό να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο αποκοπής (cut-off filter) στα φάσματα, τιθέμενο τουλάχιστον στο 10% της μέγιστης τιμής τους. Πρακτικές λεπτομέρειες για το μη ειδικό στη φασματική ανάλυση μπορούν να βρεθούν στο Fitting and Adler (1981).

Ως προς τα λάθη μετρήσεων, οι σύγχρονοι παλμογράφοι ορίζουν χρονικά το επιστρέφον κύμα με σχεδόν απόλυτη ακρίβεια. Οι φασματοσκοπικές μέθοδοι γενικά έχουν συνολικό λάθος της τάξης του $\pm 1\text{dB}$ ($< 12\%$). Γενικά η μέθοδος NDE με κύματα Rayleigh είναι ήδη καλώς θεμελιωμένη και διακρίνεται από απλότητα και ευκολία εφαρμογής, εφ' όσον ερμηνεύονται σωστά τα φυσικά φαινόμενα.

Βιβλιογραφία

Παρακάτω εκτίθενται μερικές δημοσιεύσεις που μπο-

ρούν να χρησιμεύσουν για εισαγωγή στο πεδίο του NDE με κύματα Rayleigh. Πολλές από αυτές είναι reviews που μπορούν να παραπέμψουν σε περαιτέρω δημοσιεύσεις.

1. Achenbach J.D. (1990), «From Ultrasonics to Failure Prevention» *Proc. IUTAM Symp. on Elastic wave propagation, and Ultrasonic Evaluation*, ed. S.K. Datta, J.D. Achenbach, Y.S. Rajapakse, Elsevier, (Amsterdam).
2. AGARD διάφορες εκδόσεις και meetings του Structures and Materials Panel (SMP), π.χ. AGARD Reports 768, 769, 772.
3. Auld B.A. (1973), *Acoustic fields and waves in solids*, J. Wiley and Sons, New York.
4. Coffey J.M. (1980), «Ultrasonic measurement of Crack Dimensions in Laboratory Specimens», in *The measurement of crack length and shape during fracture and fatigue*, Beevers C.J., Ed., Engineering Materials Advisory Services Ltd, (Cradley Heath, Warley, U.K.), pp. 345-385.
5. Eringen A. (1974), *Elastodynamics*, Vol. II, Academic Press, (New York).
6. Fitting D.W. and Adler L. (1981), *Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation*, Plenum Press, (New York).
7. Gautesen A.K. (1987), «Scattering of a Rayleigh wave by an Elastic Wedge» *Wave Motion*, Vol. 9, pp. 51-57.
8. Graaf K. (1975), *Wave Motion in Elastic Solids*,

- Clarendon Press, Oxford 1975.
9. Harker A.H. (1988), *Elastic waves in solids with applications to nondestructive testing of pipelines*, British Gas plc in association with Adam Hilger (Bristol).
 10. Huggell R.J., Morgan L.L. and Lumb R.F. (1974), «Nondestructive measurement of the depth of surface breaking cracks using ultrasonic Rayleigh waves», *Brit. J. NDT*, Vol. 16, pp. 144-149.
 11. Hudson J.A. and Knopoff L. (1964), «Transmission and Reflection of Surface Waves at a Corner etc», *J. Geoph. Res.*, Vol. 69, pp. 281-289.
 12. Kino G.S. (1987), *Acoustic Waves-Devices, Imaging and Analogue Signal Processing*, Prentice-Hall, (New Jersey).
 13. Kinra V. and Vu B. (1986) «Diffraction of Rayleigh Waves in half-space II. Inclined edge cracks», *J. Acoust. Soc. Am.*, 79 (6), pp. 1688-1692.
 14. Krautkraemer J. and Krautkraemer H. (1983), *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, (Berlin, Heidelberg and New York).
 15. Kundu T and Mal A.K. (1981), «Diffraction of Elastic Waves by a Surface crack on a Plate», *J. Appl. Mechanics*, Vol. 48, pp. 570-576.
 16. Lokhov V.P. (1989) «Examination of the diffraction of a Rayleigh wave at the crack edge», *Soviet J. NDT*, Vol. 25, No. 3, pp. 189-196.
 17. Pao Yih-Hsing and Mow Chao-Chow (1973), *Diffraction of Elastic waves and Dynamic Stress Concentrations*, The Rand Corporation, Russak, N.Y.
 18. Rehbein D.K., Thompson R.B. and Buck O. (1990), «Fatigue Crack Characterization by Ultrasonic Inspection», *J. Test. Eval.*, Vol. 18, No. 6, pp. 421-429.
 19. Resch M.T., Khuri-Yakub B.T., Kino G.S. and Shyne J.C. (1979), «The Acoustic Measurement of Stress Intensity Factors», *App. Phys. Lett.*, Vol. 34, pp. 182-184.
 20. Silk M.G. (1977) in *Research Techniques in NDT*, Vol. 2, ed. R.S. Sharpe, Academic Press, (Leyden).
 21. Thomson R.B. (1983), «Quantitative Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods», *J. Appl. Mechanics*, Vol. 50, pp. 1191-1201.
 22. Thomson R.B. (1983), «Quantitative Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods», *J. Appl. Mechanics*, Vol. 50, pp. 1191-1201.
 22. USAF Mil-A-83444 (1974), Military Specification Airplane Damage Tolerance Requirements.
 23. Victorov I.A. (1967), *Rayleigh Waves and Lamb Waves-Physical Theory and Application*, Plenum Press, (New York).
- Πρόεδρος:** Ευχαριστούμε το συνάδελφο κύριο Τσιρώνη για τα όσα σαφώς μας ανέπτυξε και καλούμε τον επόμενο ομιλητή κύριο Νίκο Βαξεβανίδη, μηχανολόγο μηχανικό, ερευνητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για να παρουσιάσει την κοινή εργασία την οποία εκπόνησε στο εργαστήριο εργαλειομηχάνων με τον καθηγητή κύριο Μάμαλη, με θέμα: «Η έννοια της ομοιομορφίας επιφάνειας και μη καταστροφικές μέθοδοι εκτίμησης των συνιστωσών της».
- Θα ήθελα να δείξετε ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή την εργασία, γιατί είναι μια εντελώς σύγχρονη μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται στις μηχανουργικές καταργασίες.