

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΗ
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΩΡΙΑ 2017

8^ο ΜΑΘΗΜΑ

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Τα κύματα υπερήχων ανακλώνται από τα όρια ανάμεσα σε δυο διαφορετικά μέσα που βρίσκονται σε επαφή. Το κάθε μέσο έχει χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση (acoustic impedance) και οι ανακλάσεις συμβαίνουν με παρόμοιο τρόπο όπως εκείνες που παρατηρούνται στα ηλεκτρικά σήματα.

Η ακουστική εμπέδηση εκφράζει την ταχύτητα παραμόρφωσης του υλικού όταν σε αυτό επιβάλλεται μια τάση και ορίζεται ως ο λόγος της τάσης (με αρνητικό πρόσημο, δηλ. συμπίεση) προς την ταχύτητα παραμόρφωσης. Η ακουστική εμπέδηση Z ενός μέσου ικανού να διαδώσει ηχητικά κύματα δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \rho c$$

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Υλικά με υψηλές τιμές ακουστικής εμπίεσης τα ονομάζουμε ηχητικά «σκληρά», σε αντίθεση με τα ηχητικά «μαλακά» υλικά χαμηλής ακουστικής εμπίεσης. Για παράδειγμα, ο χάλυβας

($Z = 7.7 \text{ g/cm}^3 \times 5.9 \text{ km/s} = 45.4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s} = 45.4 \text{ MRayl}$)

είναι ηχητικά σκληρότερος του αλουμινίου

($Z = 2.7 \text{ g/cm}^3 \times 6.3 \text{ km/s} = 17 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s} = 17 \text{ MRayl}$).

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Όλη σχεδόν η ακουστική ενέργεια που προσπίπτει σε μια διεπιφάνεια στερεού-αέρα ανακλάται εξαιτίας της μεγάλης αναντιστοιχίας στην ακουστική εμπέδηση ανάμεσα στον αέρα και το στερεό. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση ενός μέσου σύζευξης (coupling medium) με εμπέδηση κοντά σ' εκείνη του στερεού ώστε να διευκολύνει τη μετάδοση της ηχητικής ενέργειας από τον αισθητήρα στο υπό έλεγχο στερεό.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Το τμήμα της ηχητικής ενέργειας που ανακλάται ή μεταδίδεται μέσω κάθε διεπιφάνειας ανάμεσα σε δυο μέσα 1 και 2 είναι συνάρτηση της ακουστικής εμπέδησης των μέσων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας.

Ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient), R ,

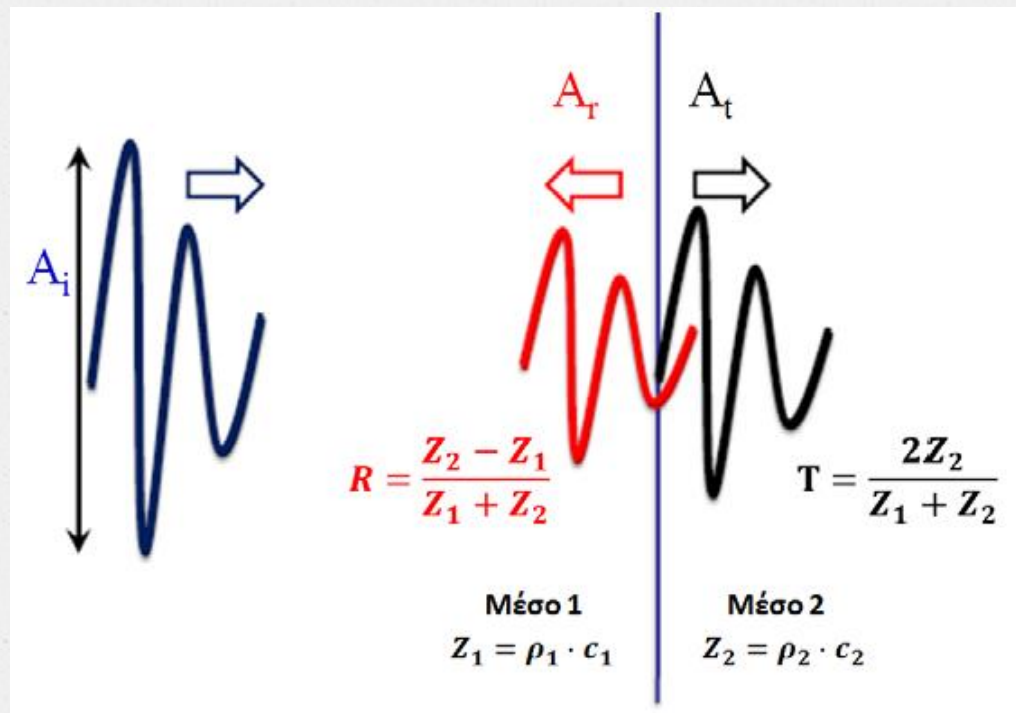
$$R = p_r/p_i = A_r/A_i = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$$

και ο συντελεστής μετάδοσης (transmission coefficient), T ,

$$T = p_t/p_i = A_t/A_i = (2 Z_2) / (Z_1 + Z_2)$$

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Ανάκλαση και μετάδοση ηχητικής ενέργειας σε διεπιφάνεια ανάμεσα σε δυο μέσα

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης για επίπεδη ατέλεια που εμπεριέχει αέρα (αέρας: $Z_2 = 0.045 \times 10^{-6} \text{ MRayl} = 0.045 \text{ Rayl}$) η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό ενός εξαρτήματος από χάλυβα (χάλυβας: $Z_1 = 45.4 \text{ MRayl}$). Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής ανάκλασης για την ατέλεια είναι ουσιαστικά -1.0 . Το αρνητικό πρόσημο δείχνει μια αλλαγή φάσης 180° για τον ανακλώμενο παλμό.

Ουσιαστικά δεν μεταδίδεται ηχητική ενέργεια μέσω ενός χάσματος με αέρα, αλλά όλη η ακουστική ενέργεια ανακλάται. Αυτός είναι και ο λόγος που οι ρωγμές σε ένα υλικό μπορούν να ανιχνευτούν με τη μη καταστροφική τεχνική των υπερήχων.

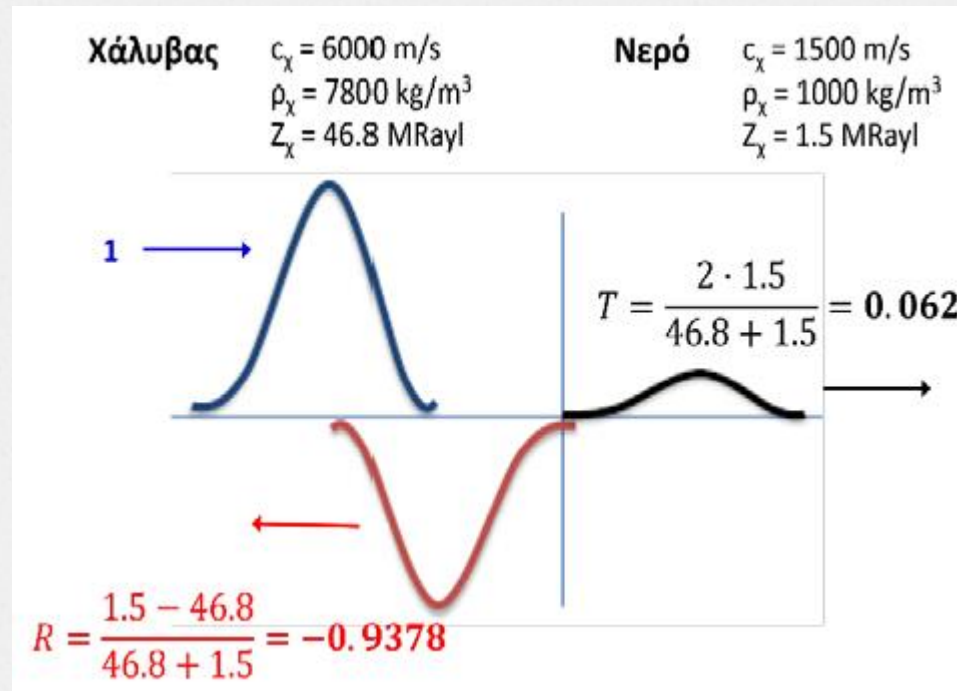
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Παρακάτω παρατίθενται δύο παραδείγματα υπολογισμού των συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

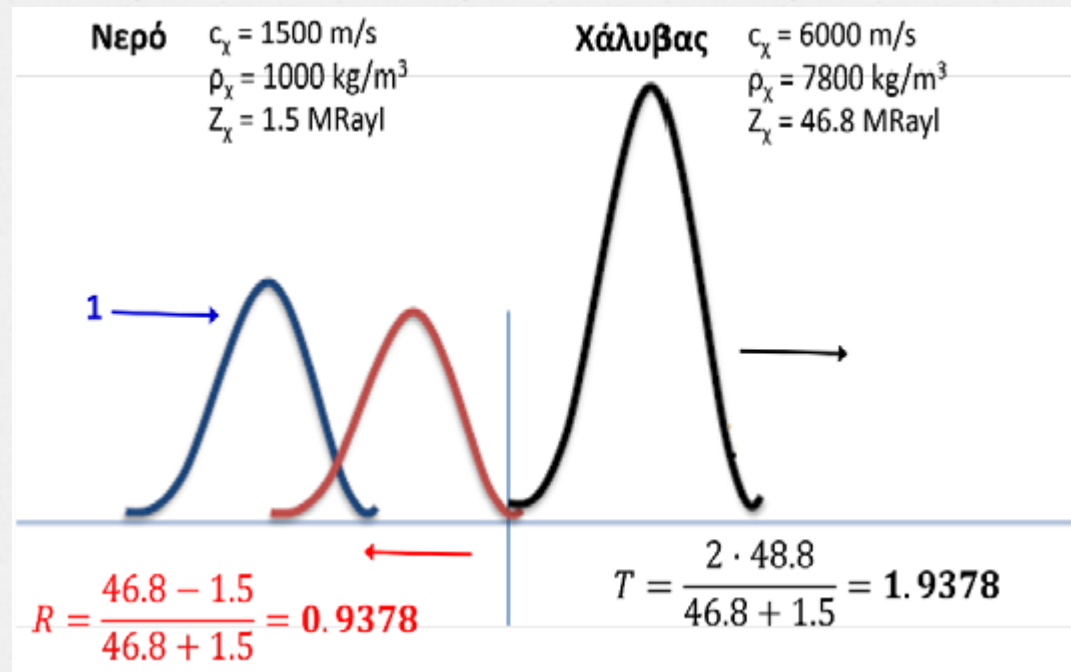
Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Το πρώτο, αφορά στην περίπτωση κύματος διαδιδόμενου από χάλυβα σε νερό

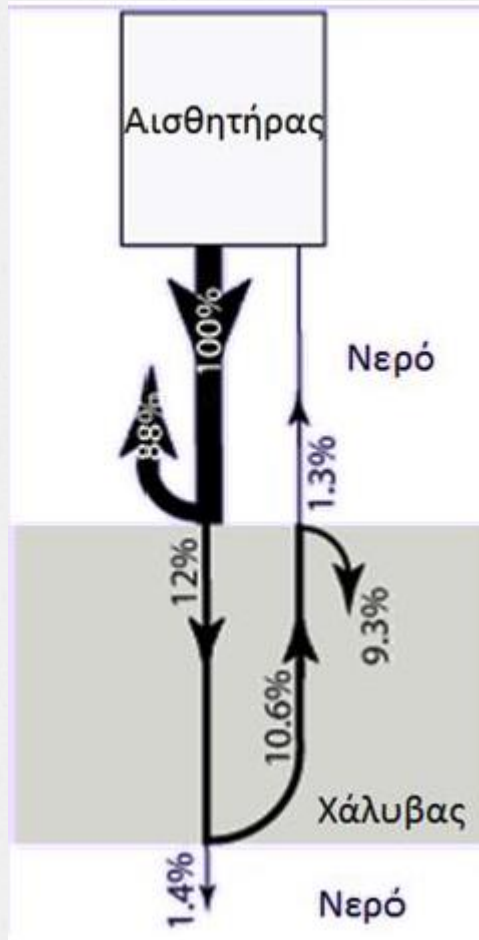
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



το δεύτερο στην περίπτωση κύματος διαιδόμενου από νερό σε χάλυβα

ΥΠΕΡΗΧΟΙ



Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Το διπλανό Σχήμα δείχνει το ποσοστό μιας δέσμης κύματος που ανακλάται ή μεταβιβάζεται σε κάθε διεπιφάνεια όταν ένα δοκίμιο από χάλυβα εμβαπτισμένο στο νερό ελέγχεται με υπερήχους, και η δέσμη προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του χάλυβα.

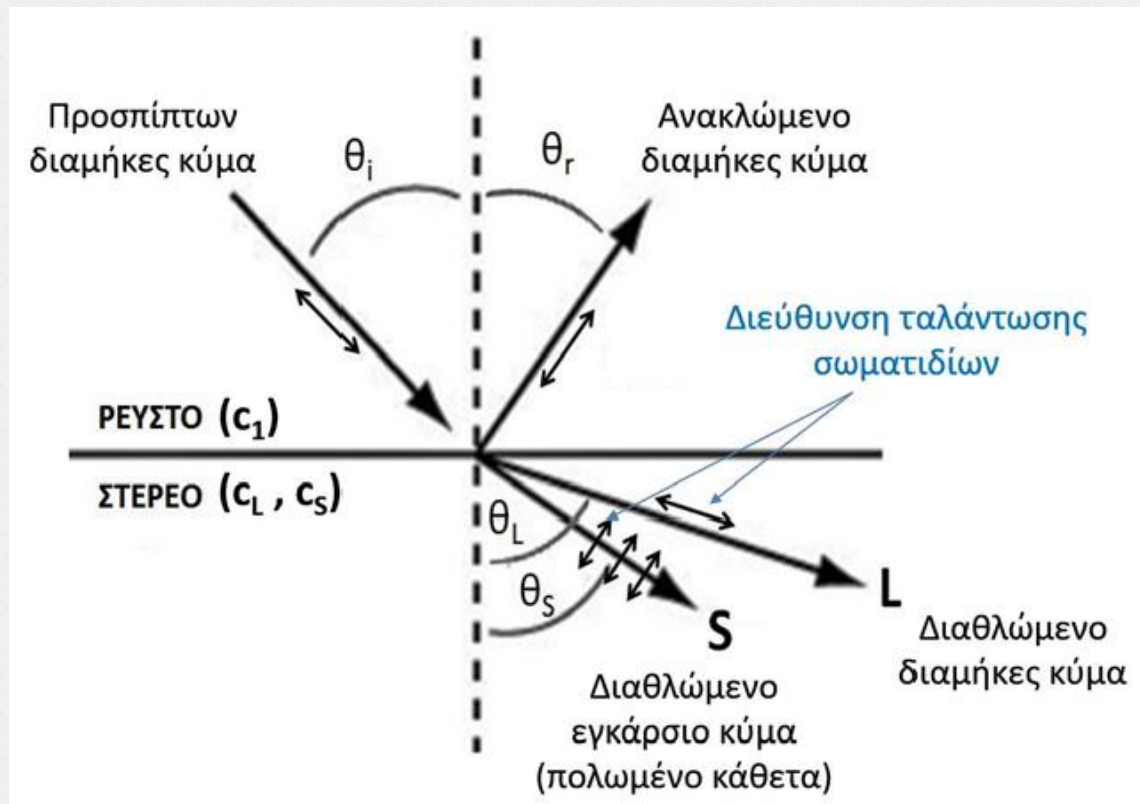
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Διάθλαση των υπερήχων

Όταν μια δέσμη υπερήχων προσπίπτει σε διεπιφάνεια μεταξύ δυο μέσων υπό γωνία, το μέρος της δέσμης που θα μεταδοθεί μέσω της διεπιφάνειας στο δεύτερο μέσο θα υποστεί διάθλαση. Στην περίπτωση διεπιφάνειας ρευστού-στερεού θα μεταδοθούν στο στερεό δύο διαθλώμενες δέσμες, διότι μέρος της μεταδιδόμενης ενέργειας θα μετατραπεί σε κύματα εγκάρσιας μορφής. Έτσι λοιπόν, όταν προσπίπτει υπό γωνία ένα διαμήκες κύμα σε μια διεπιφάνεια ρευστού-στερεού θα μεταδοθεί στο στερεό ένα διαμήκες και ένα εγκάρσιο κύμα. Η διάθλαση ενός διαμήκους κύματος από τη διεπιφάνεια με μετάδοση δυο διαφορετικών τύπων κύματος, διαμήκους (L) και εγκάρσιου (S), ονομάζεται κυματική μετατροπή (mode conversion).

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Snell και της κυματικής μετατροπής ενός διαμήκους κύματος που προσπίπτει σε διεπιφάνεια ρευστού-στερεού

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

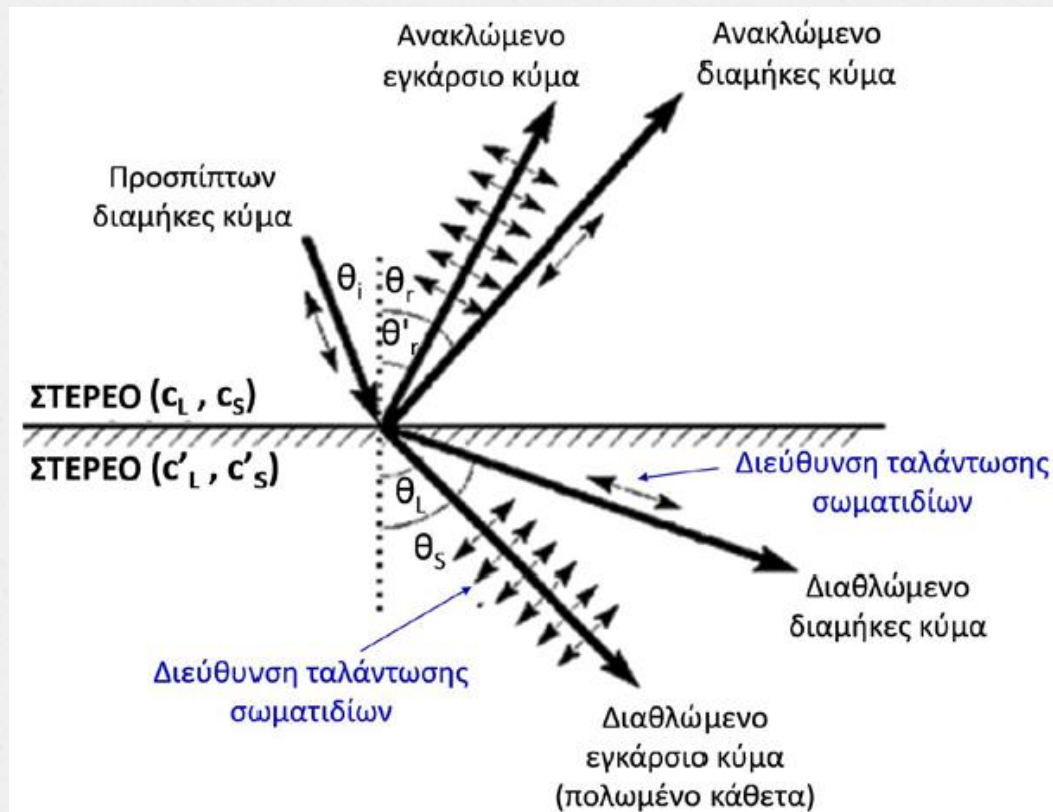
Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Επειδή τα ρευστά έχουν μικρότερη ταχύτητα διαμήκους κύματος σε σύγκριση με τις ταχύτητες διαμήκους ή εγκάρσιου κύματος στα στερεά, τα μεταδιδόμενα ακουστικά κύματα διαθλώνται σε γωνίες μακριά από την κάθετο.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση διεπιφάνειας ρευστού-στερεού δεν υπάρχει ανακλώμενο εγκάρσιο κύμα, διότι τα κύματα αυτού του τύπου δεν διαδίδονται στα ρευστά. Στην περίπτωση όμως της διεπιφάνειας μεταξύ στερεού-στερεού θα υπάρξει επίσης και ανακλώμενο εγκάρσιο κύμα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Snell και της κυματικής μετατροπής ενός διαμήκους κύματος που προσπίπτει σε διεπιφάνεια στερεού-στερεού.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

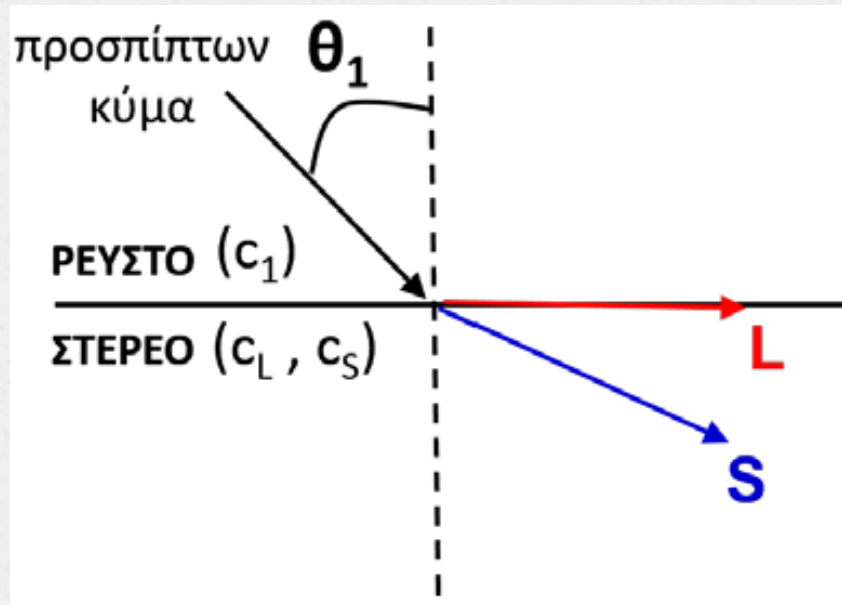
Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Αν το προσπίπτων κύμα προσεγγίζει τη διεπιφάνεια σε ολοένα αυξανόμενες γωνίες πρόσπτωσης, θα υπάρξει κάποια γωνία πάνω από την οποία δεν θα μεταδίδεται ακουστικό κύμα στο δεύτερο μέσο, το οποίο θεωρούμε ότι έχει υψηλότερες ταχύτητες ακουστικών κυμάτων. Αυτή η γωνία ονομάζεται κρίσιμη γωνία. Για την κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης, η διαθλώμενη γωνία βρίσκεται κατά μήκος της διεπιφάνειας και το διαθλώμενο κύμα δεν εισέρχεται στο στερεό.

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης θ_1 είναι τέτοια ώστε $\theta_L = 90^\circ$, επιτρέποντας μόνο στο διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να διαδίδεται στο στερεό, ονομάζεται πρώτη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Διάθλαση κύματος που προσπίπτει σε διεπιφάνεια ρευστού-στερεού υπό γωνία ίση με την πρώτη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης..

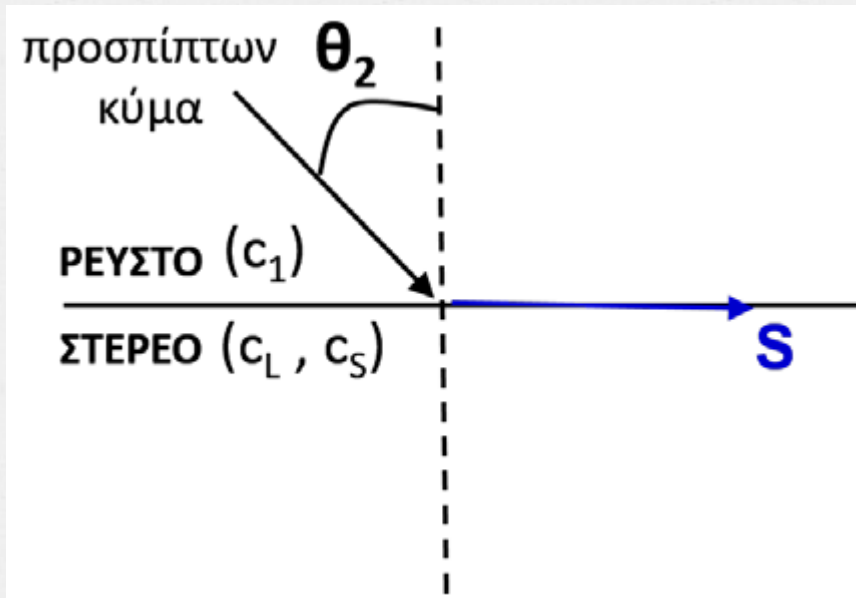
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης θ_2 είναι τέτοια ώστε $\theta_s = 90^\circ$, δεν υπάρχει κύμα που διαδίδεται στο στερεό. Η γωνία θ_2 ονομάζεται δεύτερη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Διάθλαση κύματος που προσπίπτει σε διεπιφάνεια ρευστού-στερεού υπό γωνία ίση με την δεύτερη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Για τις κρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης έχουμε τα ακόλουθα:

- Εάν $\theta_i < \theta_1$, δύο τύποι διαθλώμενων κυμάτων διαδίδονται στο στερεό, διαμήκη και εγκάρσια.
- Εάν $\theta_1 < \theta_i < \theta_2$, μόνο διαθλώμενα εγκάρσια κύματα διαδίδονται στο στερεό.
- Εάν $\theta_i > \theta_2$, δεν υπάρχει διάδοση κύματος στο στερεό.
- Εάν $\theta_i = \theta_R$, διαδίδεται κύμα Rayleigh στην επιφάνεια του στερεού.

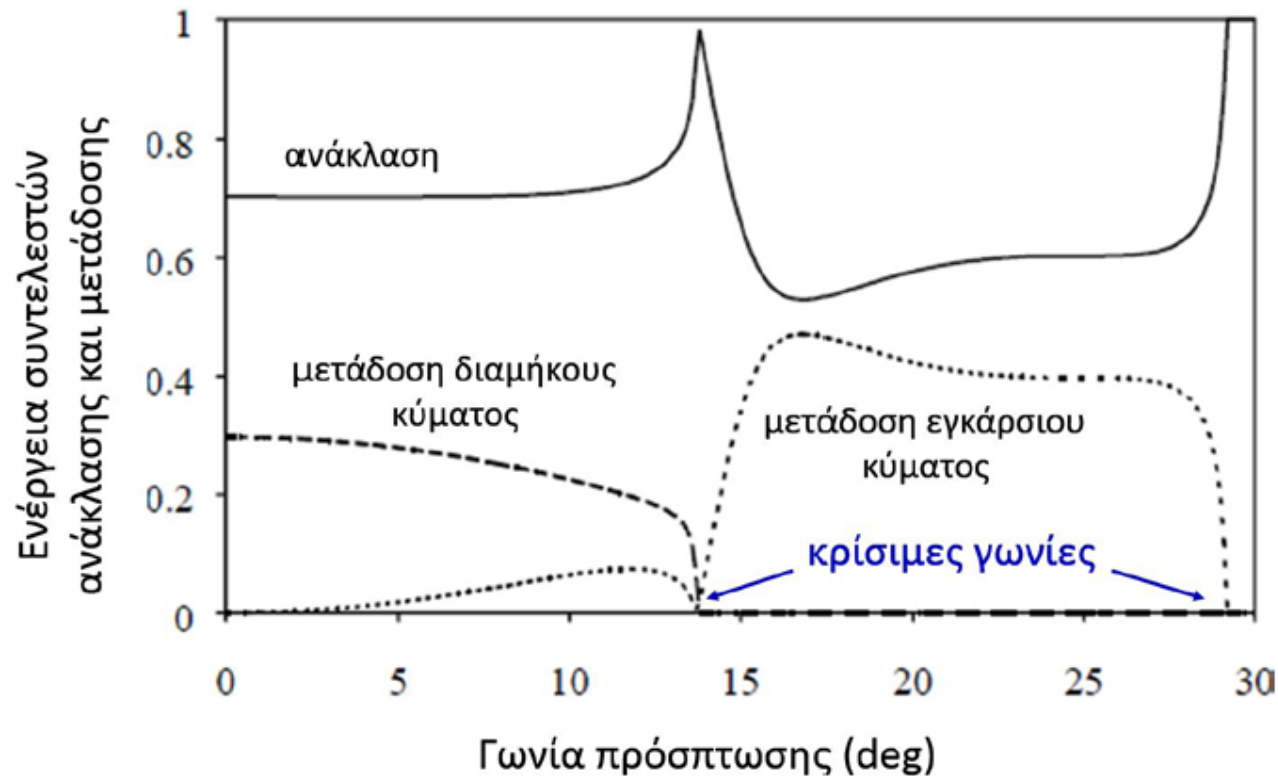
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, παριστάνεται γραφικά η κανονικοποιημένη ακουστική ενέργεια που ανακλάται και διαθλάται στη διεπιφάνεια νερού-χάλυβα ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης του διαμήκους κύματος (βλ. Σχ. 2.26). Παρατηρούμε ότι η πρώτη κρίσιμη γωνία για τον χάλυβα είναι 14.5° . Επίσης, η δεύτερη κρίσιμη γωνία είναι περίπου 30° . Συνεπώς, για γωνία πρόσπτωσης μεταξύ 14.5° και 30° μόνο το εγκάρσιο κύμα μεταδίδεται στο χάλυβα και διαδίδεται υπό γωνία διάθλασης που καθορίζεται από το νόμο του Snell. Για γωνίες πρόσπτωσης πάνω από τη δεύτερη κρίσιμη γωνία των 30° συμβαίνει πλήρης ανάκλαση του προσπίπτοντος ακουστικού κύματος και συνεπώς δεν εισέρχεται ακουστική ενέργεια στον χάλυβα. Επίσης, όταν η γωνία πρόσπτωσης του κύματος ισούται με τη γωνία Rayleigh, ακουστικά κύματα επιφάνειας δημιουργούνται και διαδίδονται στο υλικό. Η γωνία Rayleigh για τον χάλυβα είναι 29.5° .

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος



Ενέργεια των συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης ως προς τη γωνία πρόσπτωσης για διαμήκες κύμα που προσπίπτει στη διεπιφάνεια νερού-χάλυβα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Ανάκλαση και μετάδοση του κύματος

Η περιοχή ανάμεσα στις δυο κρίσιμες γωνίες, όπου παράγεται μόνο εγκάρσιο κύμα, αναφέρεται ως έλεγχος με εγκάρσια κύματα (shear wave testing) και παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών. Καταρχάς, με την παρουσία ενός μόνο τύπου ακουστικού κύματος στο υπό έλεγχο υλικό περιορίζεται η ασάφεια αναφορικά με τις κυματικές ανακλάσεις από κάποια ατέλεια. Επίσης, η μικρότερη κυματική ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων διευκολύνει την επίλυση αποστάσεων εντός του υλικού. Για τους λόγους αυτούς, ο έλεγχος με εγκάρσια κύματα επιλέγεται συχνά για επιθεώρηση λεπτών μεταλλικών κατασκευών, όπως οι δομές ενός αεροσκάφους. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για τους συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης που παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό, πολλά στοιχεία μπορούν να συναχθούν σχετικά με οποιοδήποτε έλεγχο με υπερήχους όταν τα ακουστικά κύματα προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του υλικού. Για άλλες γωνίες πρόσπτωσης, υπολογιστικά προγράμματα χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ακουστικών αλληλεπιδράσεων.

Για τον έλεγχο με υπερήχους υλικών με πολυπλοκότερη δομή, όπως για παράδειγμα σύνθετα μεταλλικά υλικά ενισχυμένα με ίνες, απαιτείται η χρήση πιο περίπλοκων αλγορίθμων για την ανάλυση της πολυπλοκότητας των τρόπων κυματικής διάδοσης που λαμβάνει χώρα στα υλικά αυτά.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

Για την παραγωγή και λήψη κυμάτων υπερήχων, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας (transducer) για τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε ηχητικά κύματα και το αντίστροφο. Ένας τέτοιος αισθητήρας υπερήχων είναι μια συσκευή ικανή να παράγει και να λαμβάνει τις υπερηχητικές δονήσεις. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο που συνήθως είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος, στερεωμένος σε μια κατάλληλη θήκη που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με ένα πομπό και έναν δέκτη. Η λειτουργία του αισθητήρα ως πομπού βασίζεται στην εφαρμογή στον κρύσταλλο μιας υψηλής τάσης και ηλεκτρικής εκκένωσης μικρής διάρκειας, προκαλώντας ραγδαία αλλαγή του σχήματός του με αποτέλεσμα να εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό. Κατά τη λειτουργία του αισθητήρα ως δέκτη, ηχητικά κύματα ή αντηχήσεις (echoes) που επιστρέφουν συμπιέζουν τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και υπόκειται σε επεξεργασία από το δέκτη.

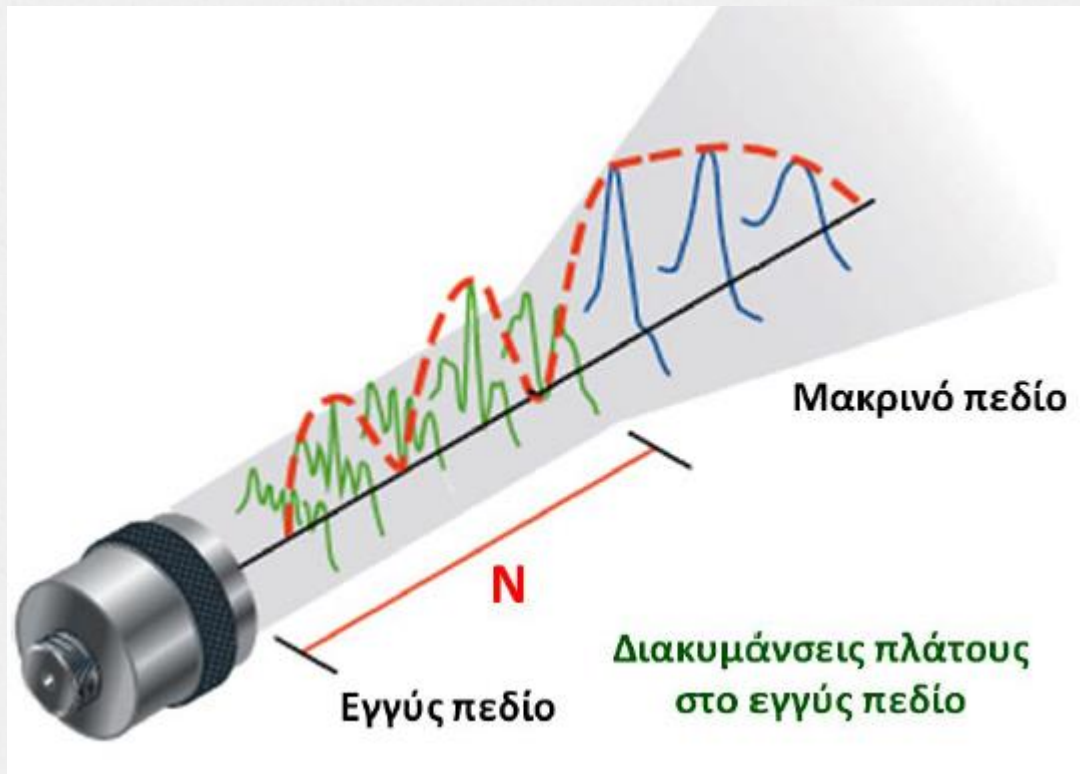
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

Το πεδίο ήχου ενός αισθητήρα έχει δύο διακεκριμένες ζώνες, τη ζώνη εγγύς πεδίου (near field) ή περιοχή Fresnel, που βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τον αισθητήρα, και μακρινού πεδίου (far field) ή περιοχή Fraunhofer, που βρίσκεται πέρα από την απόσταση του εγγύς πεδίου, N , όπου η πίεση του ηχητικού πεδίου μειώνεται σταδιακά έως ότου μηδενιστεί

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Το πεδίο ήχου
ενός
αισθητήρα
υπερήχων με
τις ζώνες
εγγύς πεδίου
και μακρινού
πεδίου.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

Η απόσταση εγγύς πεδίου είναι συνάρτηση της διαμέτρου του ενεργού στοιχείου, της συχνότητας του αισθητήρα και της ταχύτητας του ήχου (ή του μήκους κύματος) του υπό εξέταση υλικού σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$N = \frac{D^2 f}{4 c} = \frac{D^2}{4 \lambda}$$

N = απόσταση εγγύς πεδίου

D = διάμετρος ενεργού στοιχείου

f = συχνότητα αισθητήρα

c = ταχύτητα του ήχου στο υλικό

λ = μήκος κύματος

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

Εξαιτίας των διακυμάνσεων του πλάτους στο εγγύς πεδίο είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με ακρίβεια και να αξιολογηθούν οι ατέλειες όταν το υπό έλεγχο υλικό βρίσκεται στη περιοχή αυτή (δηλαδή σε απόσταση μικρότερη του N από την επιφάνεια αισθητήρα).

Υπάρχουν πολλές παράμετροι του ηχητικού πεδίου που χρησιμεύουν στην περιγραφή των χαρακτηριστικών ενός αισθητήρα υπερήχων. Η γνώση του εστιακού μήκους (focal length), του εύρους της δέσμης (beam width) και της εστιακής ζώνης (focal zone) μπορεί να είναι αναγκαία προκειμένου να προσδιοριστεί κατά πόσον ένας συγκεκριμένος αισθητήρας είναι κατάλληλος για κάποια εφαρμογή.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

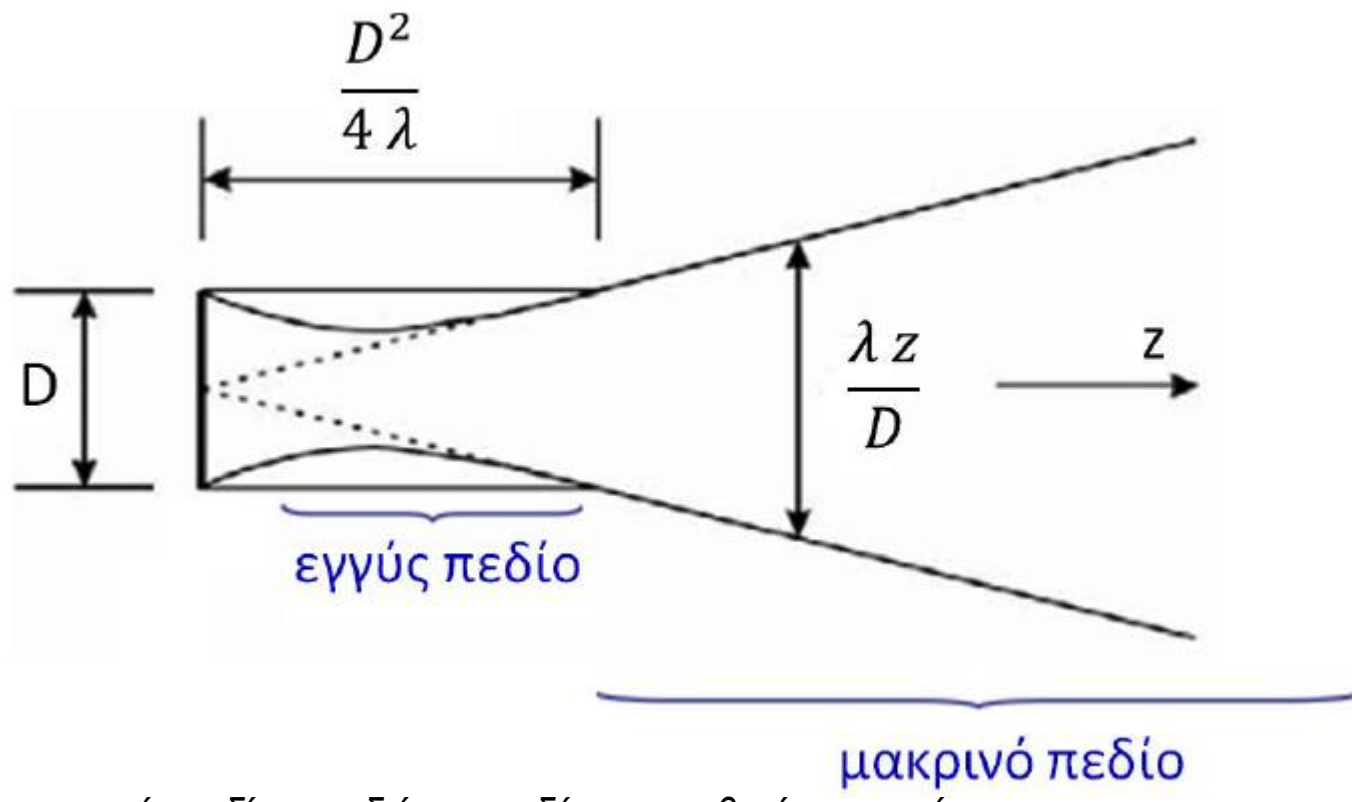
Αισθητήρες υπερήχων

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα επηρεάζεται από τη διάμετρο της δέσμης στο σημείο ενδιαφέροντος. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της δέσμης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που ανακλάται από την ατέλεια. Η διάμετρος της δέσμης δίνεται από τη σχέση:

$$BD = 1.02 \frac{\lambda z}{D}$$

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Απόσταση εγγύς πεδίου και διάμετρος δέσμης αισθητήρα υπερήχων.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

Τα σημεία αρχής και τέλους της εστιακής ζώνης βρίσκονται πάνω στον άξονα της δέσμης, εκεί όπου το πλάτος του σήματος πέφτει στα -6dB του πλάτους του εστιακού σημείου. Το μήκος της εστιακής ζώνης μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_z = N S_F^2 \left[\frac{2}{1 + 0.5 S_F} \right]$$

όπου,

$$S_F = F/N$$

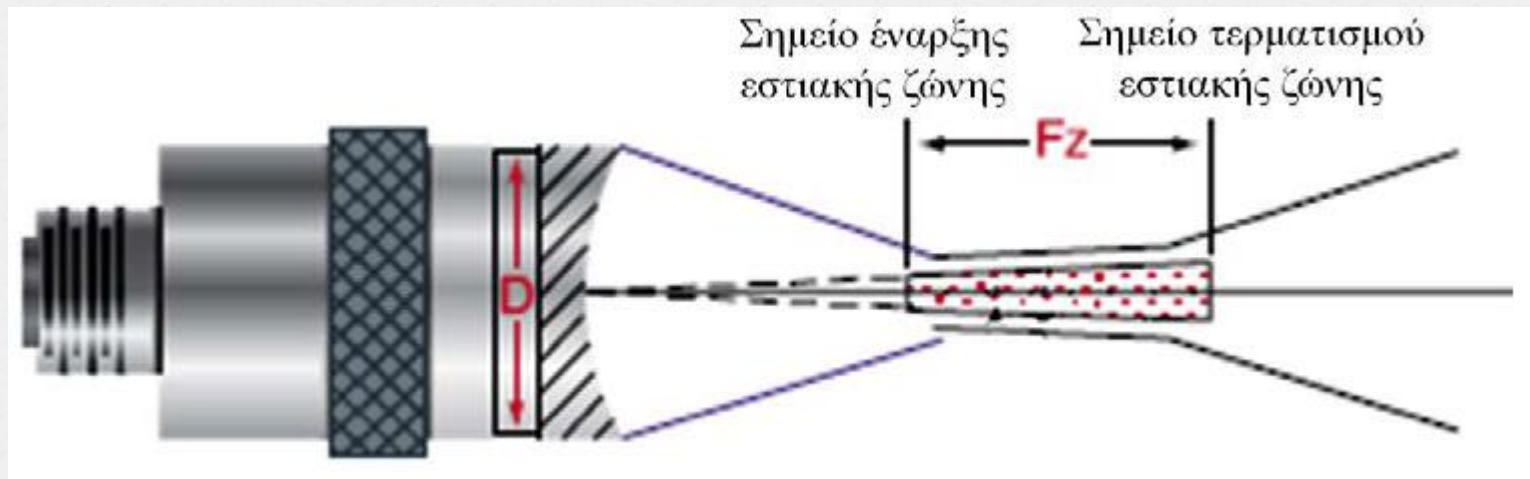
F_z = μήκος της εστιακής ζώνης

N = απόσταση εγγύς πεδίου

S_F = κανονικοποιημένο εστιακό μήκος

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Μήκος εστιακής ζώνης αισθητήρα υπερήχων.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

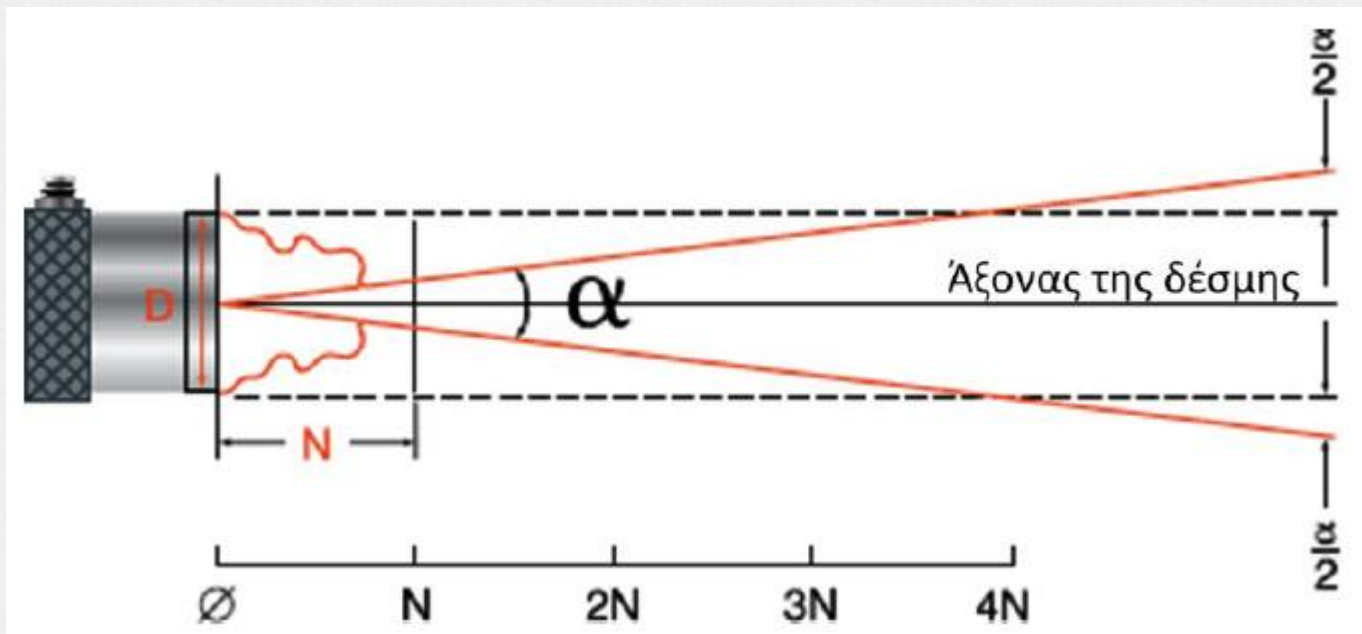
Αισθητήρες υπερήχων

Όλοι οι αισθητήρες έχουν εξάπλωση της δέσμης τους. Το να λαμβάνεται υπόψη η εξάπλωση της δέσμης του αισθητήρα είναι σημαντικό όταν επιθεωρούνται ρωγμές ή άλλες ατέλειες που μπορεί να είναι κοντά σε ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό έλεγχο υλικού. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν πλευρικά τοιχώματα και γωνίες του εξαρτήματος που μπορούν να προκαλέσουν ψευδή αντήχηση και θα μπορούσαν να εκληφθούν λανθασμένα ως ατέλειες ή ελαττώματα.

Για επίπεδους (χωρίς εστίαση) αισθητήρες, η εξάπλωση της δέσμης στα -6dB είναι καλά καθορισμένη.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Εξάπλωση δέσμης αισθητήρα υπερήχων.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

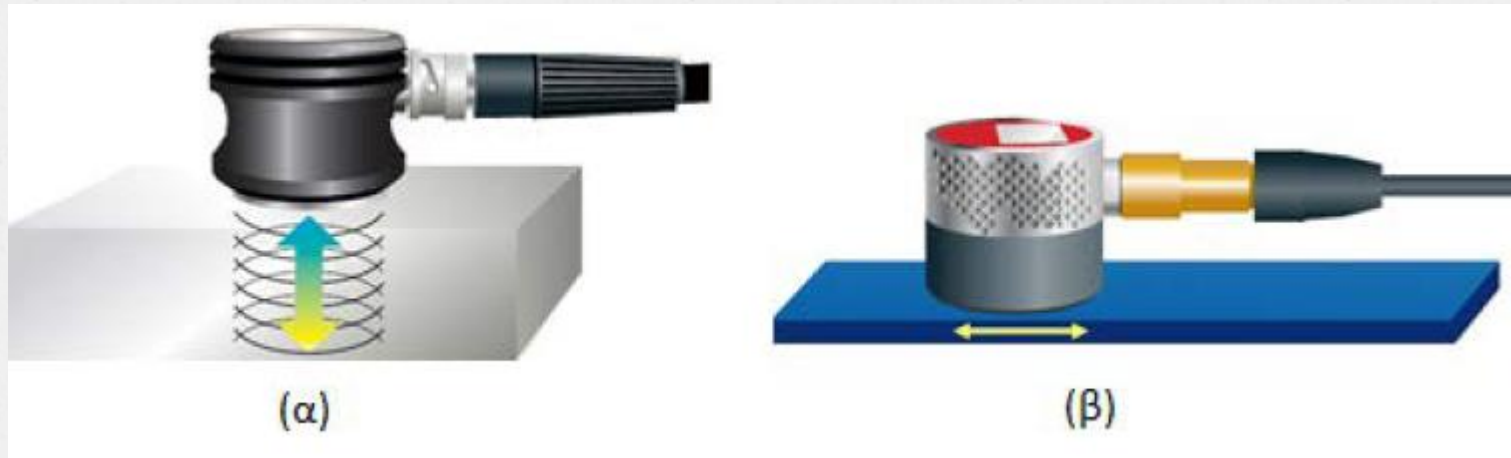
Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων, όπως:

(i) Αισθητήρες επαφής (contact transducers) ευθείας δέσμης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε άμεση επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Χωρίζονται σε αισθητήρες επαφής διαμηκών κυμάτων για την εισαγωγή διαμηκών κυμάτων στο υλικό και αισθητήρες επαφής εγκάρσιων κυμάτων, οι οποίοι κατασκευάζονται με ειδικά ενεργά

στοιχεία, για την εισαγωγή εγκάρσιων κυμάτων στο υλικό

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Αισθητήρες επαφής (α) διαμηκών κυμάτων, και (β) εγκάρσιων κυμάτων.

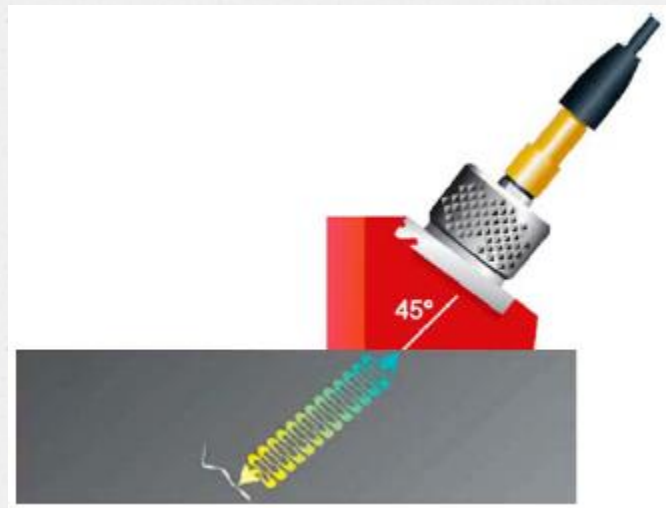
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

(ii) Αισθητήρες επαφής γωνιακής δέσμης (angle beam transducers), οι οποίοι χρησιμοποιούν τη βασική αρχή της διάθλασης και του φαινομένου της κυματικής μετατροπής (mode conversion) για την παραγωγή στο υπό εξέταση υλικό διαθλώμενων διαμηκών ή εγκαρσίων κυμάτων. Για την παραγωγή υπερήχων με αισθητήρες επαφής γωνιακής δέσμης απαιτείται ειδική συσκευή, η οποία αποκαλείται σφήνα (wedge), η οποία επιτρέπει το κύμα υπερήχων να προσπίπτει στο δοκίμιο σε μια συγκεκριμένη γωνία.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Αισθητήρας επαφής γωνιακής δέσμης με σφήνα.

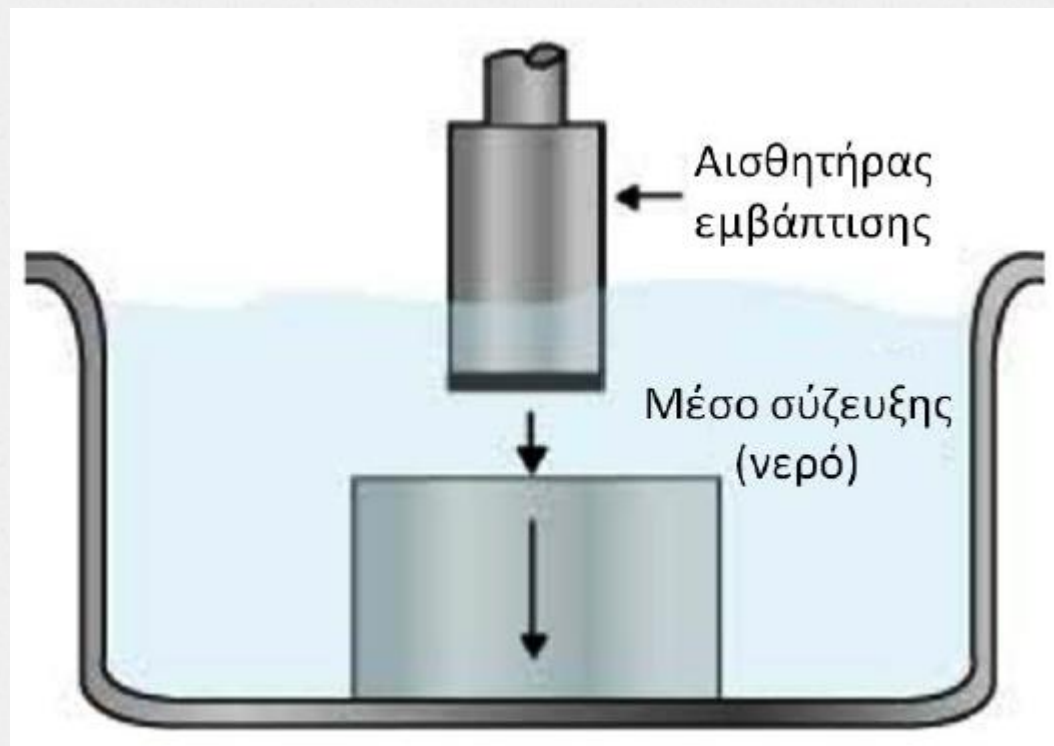
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων

(iii) Αισθητήρες εμβάπτισης (immersion transducers), οι οποίοι ελέγχουν το υλικό εμβαπτισμένο σε νερό. Οι αισθητήρες του τύπου αυτού παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα. Η ομοιόμορφη σύζευξη που εξασφαλίζει το νερό μειώνει τις διακυμάνσεις στην ευαισθησία. Επίσης, έχουν την ικανότητα να εκτελούν αυτοματοποιημένη σάρωση. Τέλος, η δυνατότητα εστίασης των αισθητήρων εμβάπτισης αυξάνει την ευαισθησία στην ανίχνευση μικρών ατελειών. Οι αισθητήρες εμβάπτισης είναι διαθέσιμοι ως επίπεδοι (χωρίς εστίαση), καθώς και με σφαιρική ή κυλινδρική εστίαση. Ένας επίπεδος αισθητήρας εμβάπτισης χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές όπως για μετρήσεις υλικών μεγάλου πάχους. Ένας σφαιρικά εστιασμένος (focused) αισθητήρας θα βελτιώσει την ευαισθησία σε μικρές ρωγμές και άλλες ατέλειες. Κυλινδρικά εστιασμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση σωληνώσεων. Το εύρος των εστιακών μηκών για ένα σφαιρικό ή κυλινδρικό αισθητήρα περιορίζεται από το εγγύς πεδίο του αισθητήρα και είναι γενικά έως 0,8 λ .

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Αισθητήρες υπερήχων



Αισθητήρας εμβάπτισης.

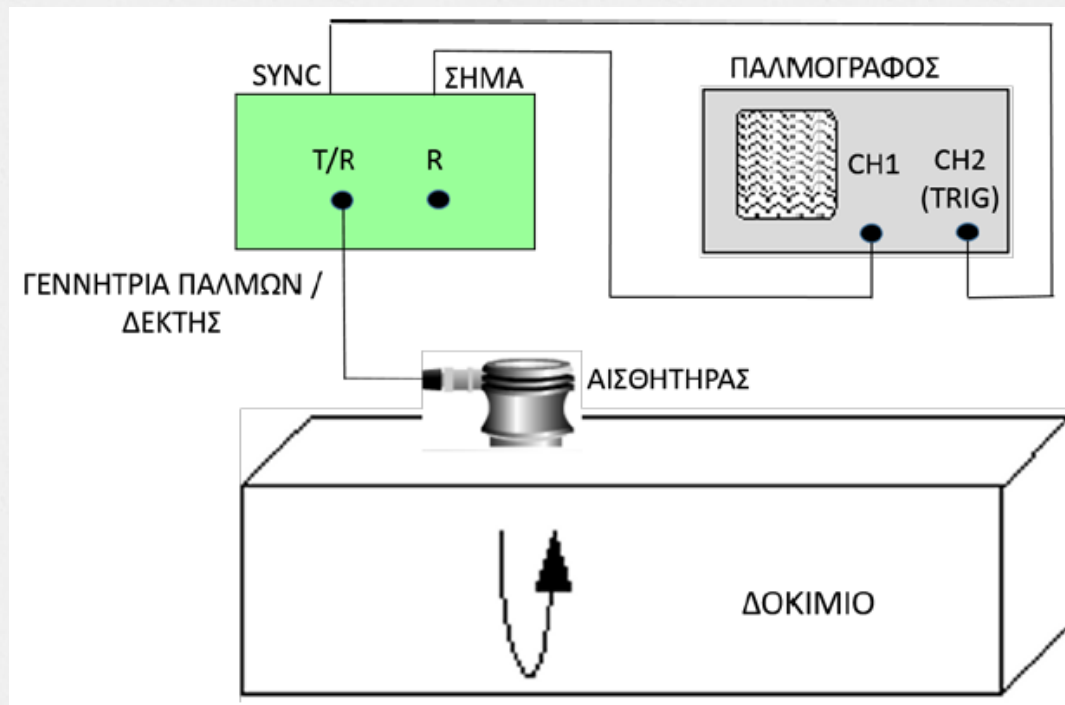
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μέσα σύζευξης

Ανάμεσα στον αισθητήρα υπερήχων και στο υπό έλεγχο υλικό παρεμβάλλεται ένα μέσο σύζευξης (coupling medium) ώστε να διευκολύνει τη μετάδοση της ηχητικής ενέργειας από τον αισθητήρα στο στερεό. Ένα υγρό μέσο σύζευξης έχει προφανή πλεονεκτήματα για τον μη καταστροφικό έλεγχο δομών σύνθετης γεωμετρίας, και το νερό είναι το μέσο εκείνο που τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται για τη σύζευξη. Στην περίπτωση αυτή το υλικό είναι εμβαπτισμένο στο νερό και χρησιμοποιούνται αισθητήρες εμβάπτισης για τον έλεγχο με υπερήχους. Εναλλακτικά, για εξαρτήματα με απλούστερες γεωμετρίες ή όταν δεν μπορούμε να τα εμβαπτίσουμε στο νερό (π.χ. έλεγχος σωληνώσεων, τμημάτων αεροσκαφών στο πεδίο, κλπ.) χρησιμοποιούνται αισθητήρες επαφής και το υλικό σύζευξης είναι ένα ειδικό ζελέ (προπυλενογλυκόλη, κλπ.). Σε δύσκολες εφαρμογές, όπου απαιτείται η μέγιστη μεταφορά ακουστικής ενέργειας στο υπό έλεγχο υλικό (όπως για παράδειγμα στον έλεγχο με εγκάρσια κύματα), χρησιμοποιείται γλυκερίνη ή ακόμα και μέλι. Ωστόσο, σε ορισμένα μέταλλα η γλυκερίνη μπορεί να προκαλέσει διάβρωση μέσω της απορρόφησης του νερού και έτσι η χρήση της μπορεί να είναι ανεπιθύμητη. Άλλα μέσα σύζευξης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ελέγχους σε κανονικές θερμοκρασίες είναι διάφορα έλαια, γράσα, και σιλικονούχα υγρά.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους



Το βασικό
διάγραμμα
ενός
συστήματος
ελέγχου
υλικών με
υπερήχους
εικονίζεται στο
Σχήμα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους

Τα κύρια τμήματα του συστήματος είναι:

- ο Γεννήτρια παλμών/δέκτη υπερήχων (συνήθως συνδέεται με σύστημα Η/Υ) στην οποία περιλαμβάνεται ένας χρονιστής που ελέγχει το ρυθμό δημιουργίας παλμών υπερήχων, δηλαδή τη συχνότητα επανάληψης παλμών, και εξασφαλίζει το συγχρονισμό του σήματος (TRIGGER).
- ο Παλμογράφος (ή κατάλληλο λογισμικό για την παραγωγή και ανάλυση των παλμών, όταν το σύστημα είναι συνδεδεμένο με Η/Υ).
- ο Αισθητήρας (εμβάπτισης ή επαφής).
- ο Μέσο σύζευξης ανάμεσα στον αισθητήρα και στο υπό έλεγχο δοκίμιο (νερό ή ειδικό ζελέ για διαμήκη κύματα, γλυκερίνη ή μέλι για εγκάρσια κύματα).

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους

Στο παράδειγμα του παραπάνω διαγράμματος παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη σε διαμόρφωση πομπού/δέκτη (έξοδος T/R), δηλαδή με τη χρήση ενός μόνο αισθητήρα ο οποίος παράγει αλλά και λαμβάνει ταυτόχρονα υπερήχους. Σε πολλές εφαρμογές όμως, στη διαμόρφωση πομπού/δέκτη χρησιμοποιούνται δυο αισθητήρες, ο ένας για την παραγωγή παλμών και ο δεύτερος για την λήψη των παλμών συνδέοντας τον αισθητήρα αυτόν με την έξοδο R της γεννήτριας υπερήχων.

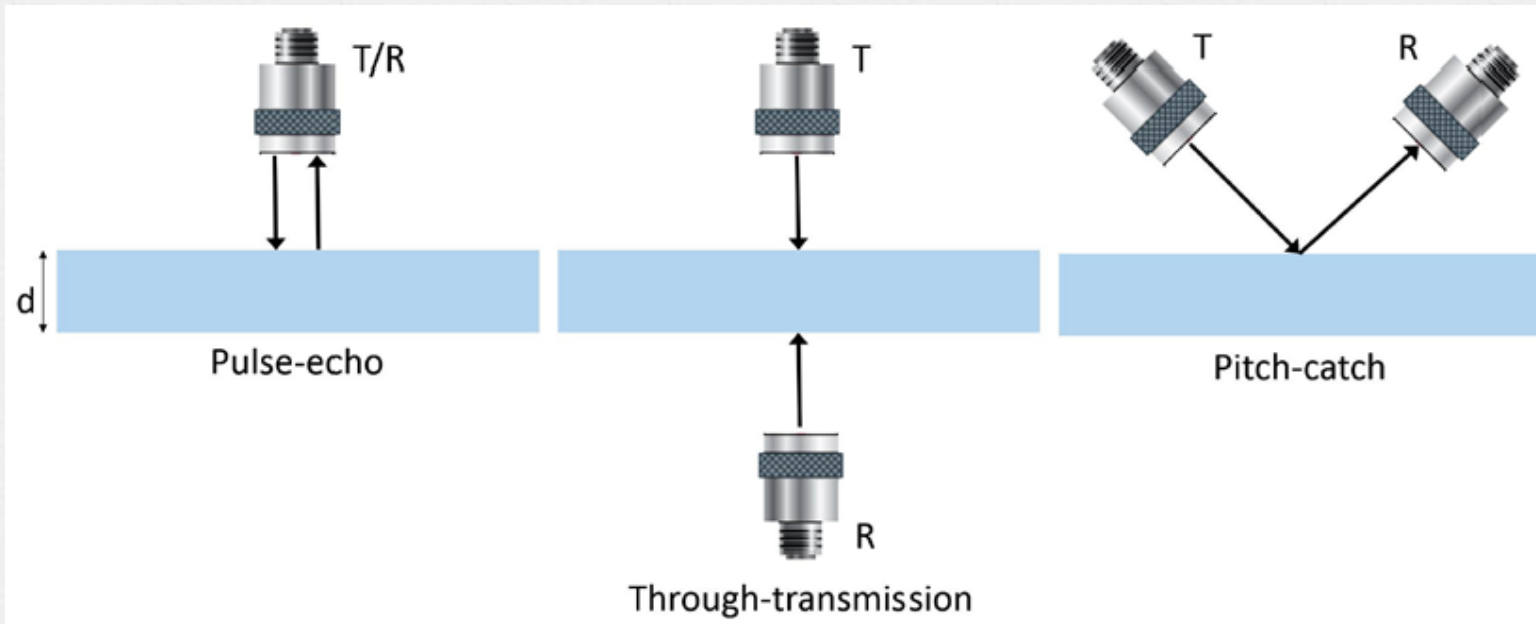
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Διατάξεις πομπού-δέκτη

Για τον έλεγχο υλικών με χρήση δυο αισθητήρων, όπου ο ένας δρα ως πομπός (T) για την παραγωγή παλμών και ο άλλος ως δέκτης (R) για την ανίχνευση του σήματος, χρησιμοποιούνται τρεις κοινές διατάξεις – τεχνικές ελέγχου.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Διατάξεις πομπού-δέκτη



Τρεις κοινές διατάξεις-τεχνικές πομπού-δέκτη: παλμού-ηχούς (pulse-echo), απ' ευθείας μετάδοσης (throughtransmission), και γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch).

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

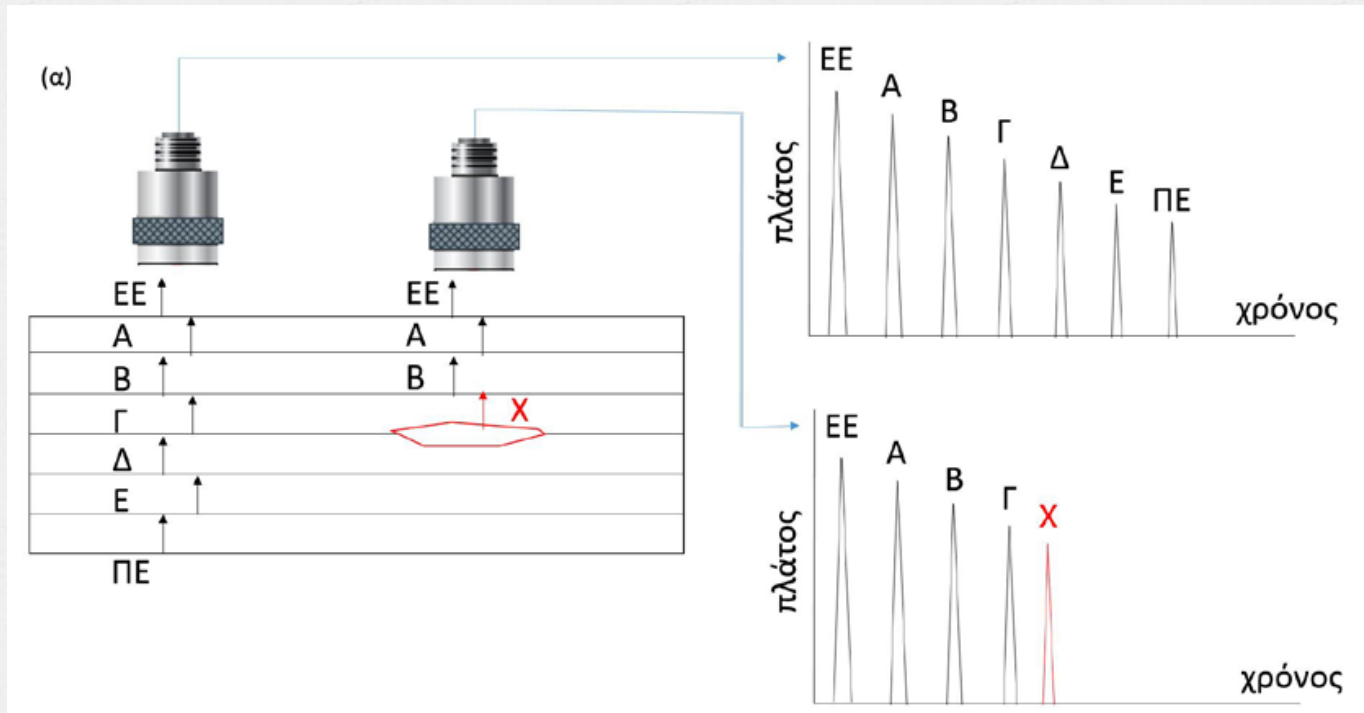
Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo)

Στην τεχνική ελέγχου υπερήχων pulse-echo, ένας μοναδικός αισθητήρας υπερήχων παράγει παλμό υπερήχων και επίσης λαμβάνει την «ηχώ» του (T/R). Οι περισσότεροι αισθητήρες υπερήχων χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρονικό παλμό για να παράγουν ένα αντίστοιχο ηχητικό παλμό με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ένας βραχύς (διάρκειας λιγότερο από 20 ns), ηλεκτρικός παλμός υψηλής τάσης (πλάτους 100-200V) διεγείρει ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο για να παράγει ένα παλμό υπερήχων.

Ο αισθητήρας εκπέμπει τον παλμό υπερήχων κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου πάχους d . Ο παλμός υπερήχων διαδίδεται μέσω του υλικού και ανακλάται από την απέναντι πλευρά. Ο αισθητήρας στη συνέχεια ανιχνεύει τις ανακλώμενες αντηχήσεις. Ο παλμός υπερήχων συνεχίζει να ανακλάται από τις απέναντι επιφάνειες του δοκιμίου και εξασθενεί με την πάροδο του χρόνου. Ο χρονική διάρκεια ανάμεσα σε δυο αντηχήσεις (Δt) ισούται με το χρόνο που απαιτείται ώστε ο παλμός να ταξιδέψει μέσω του δοκιμίου και να επιστρέψει πίσω στον αισθητήρα. Η εξασθένηση του πλάτους του σήματος είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

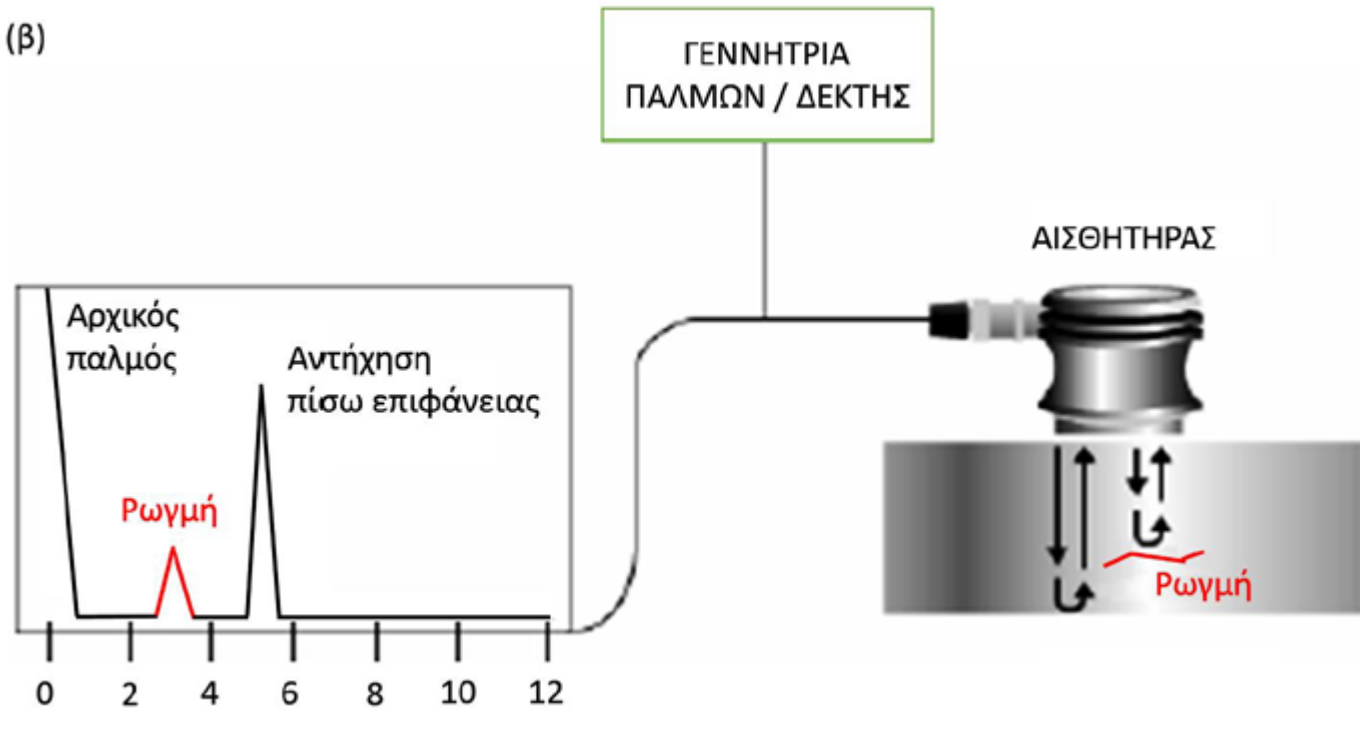
Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo)



ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους
Μέθοδος παλμού-ηχούς (pulse-echo)

(β)



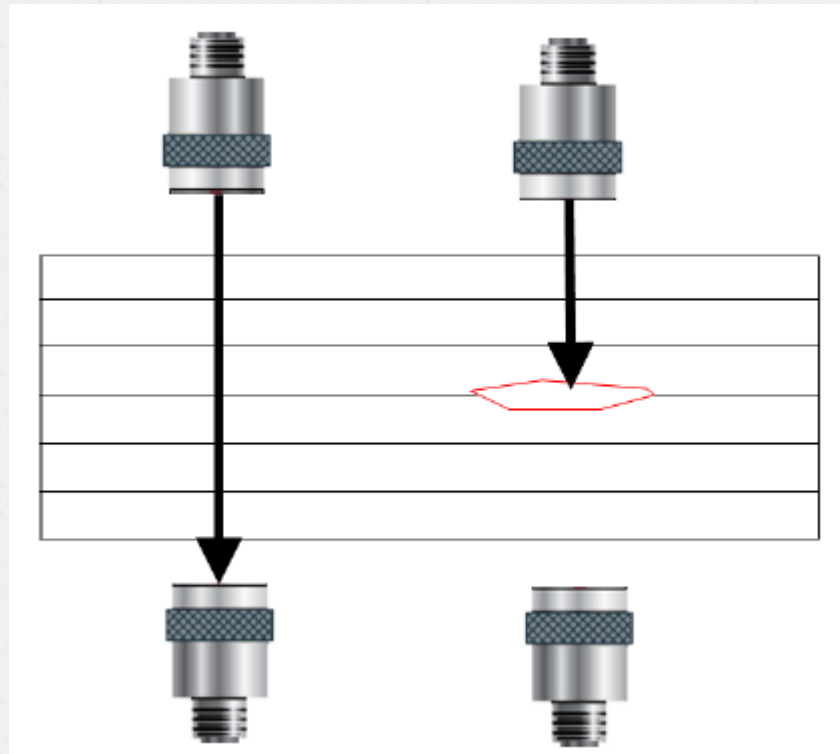
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης (through- transmission)

Όπως είδαμε έως τώρα, ο έλεγχος των υλικών με υπερήχους αφορούσε τη χρήση ενός μοναδικού αισθητήρα που αποστέλλει ένα σήμα στο δοκίμιο και επίσης λαμβάνει τις αντηχήσεις που επιστρέφουν. Συχνά όμως χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικοί αισθητήρες για τον έλεγχο των υλικών, όπου ο ένας λειτουργεί ως πομπός παλμών υπερήχων και ο άλλος τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου ως δέκτης, για να λαμβάνει τα μεταδιδόμενα σήματα αφού διασχίσουν το υπό έλεγχο δοκίμιο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους
Μέθοδος απ' ευθείας μετάδοσης (through-transmission)



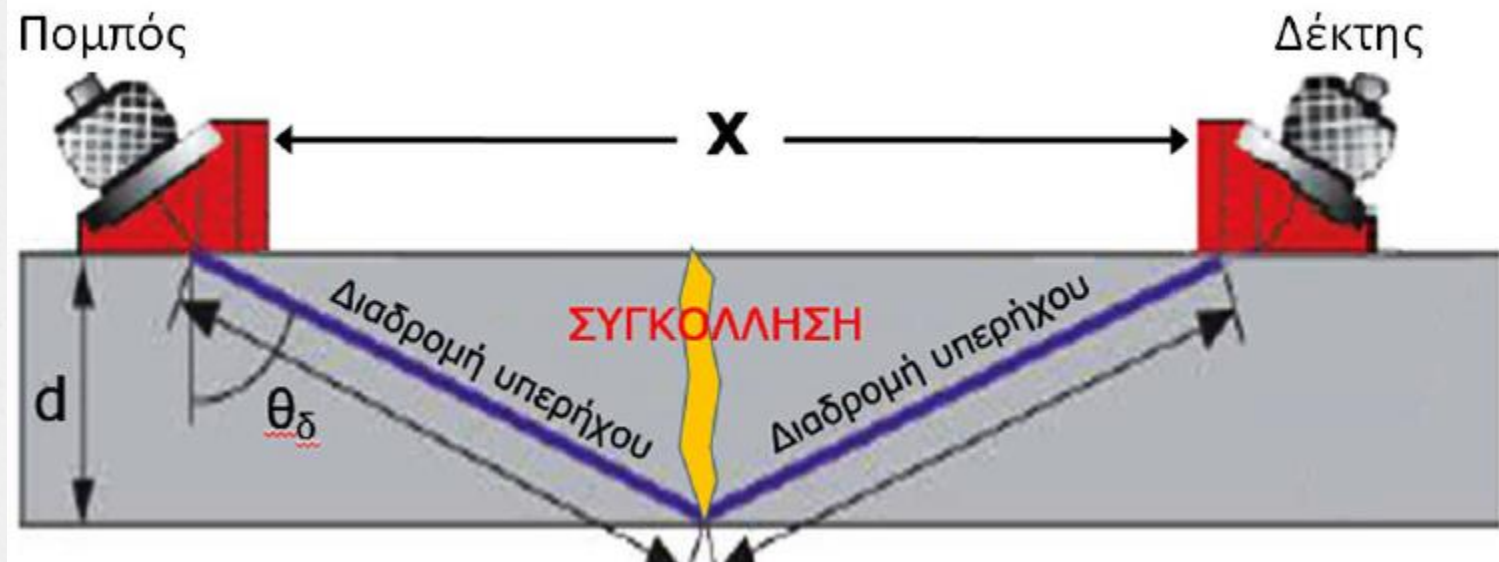
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch)

Υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις ελέγχου, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης ενός αισθητήρα κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου, και ως μόνη λύση προσφέρεται η χρήση δυο αισθητήρων υπό γωνία. Επιπλέον, η τεχνική αυτή σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα ελέγχου. Ένα παράδειγμα, όπου η χρήση της τεχνικής αυτή ενδείκνυται, είναι ο έλεγχος της ζώνης συγκόλλησης σε παράλληλες πλάκες. Οι δύο αισθητήρες τοποθετούνται υπό γωνία. Αν υπάρχει ελάττωμα στην περιοχή της συγκόλλησης, θα προκληθεί μείωση του πλάτους του σήματος που λαμβάνεται.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους
Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch)



ΥΠΕΡΗΧΟΙ

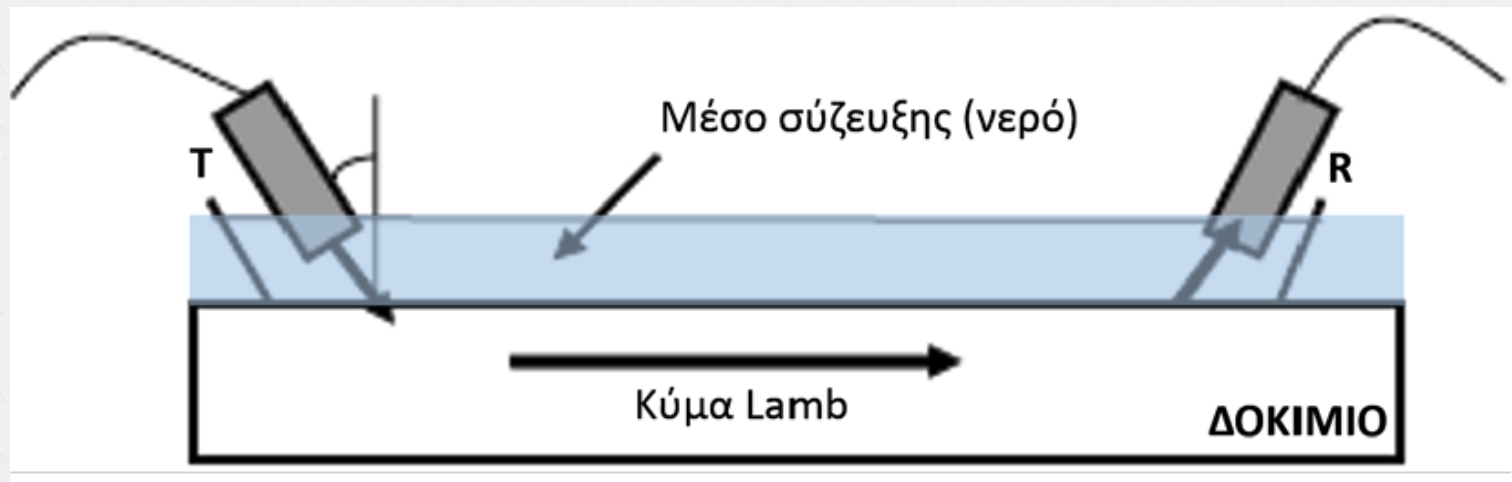
Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους

Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch)

Ένα άλλο παράδειγμα τεχνικής πομπού-δέκτη σε διάταξη pitch-catch είναι το L-scan σάρωση με κύματα Lamb (Lamb wave scanning). Στην περίπτωση αυτή, οι δυο αισθητήρες βρίσκονται σε κατάλληλη γωνία ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου ώστε να παράγουν συγκεκριμένο τύπο κυμάτων Lamb στο δοκίμιο.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους
Μέθοδος γωνιώδους ανάκλασης (pitch-catch)



ΥΠΕΡΗΧΟΙ

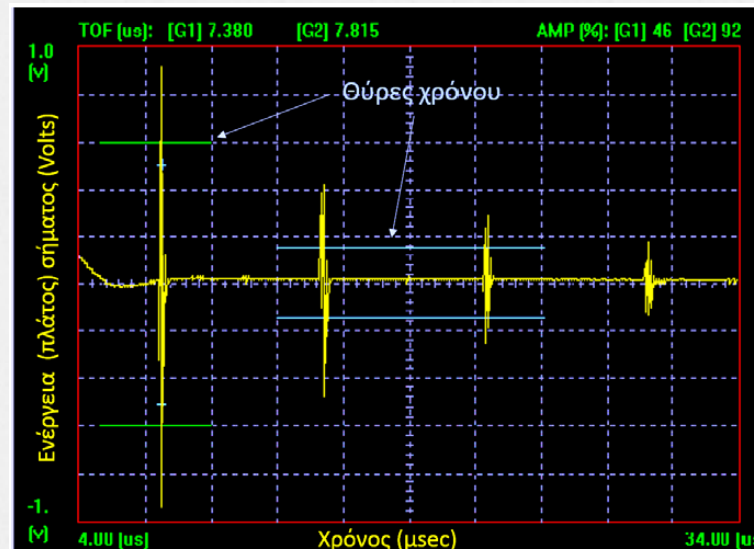
Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων

Οι τρεις πιο κοινοί τρόποι απεικόνισης των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους είναι γνωστοί ως A-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου A), B-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου B) και C-scan (απεικόνιση σάρωσης τύπου C).

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων

Το **A-scan** παρουσιάζει το ποσό της ενέργειας των υπερήχων που λαμβάνεται (πλάτος του παλμού που επιστρέφει σε Volts) ως συνάρτηση του χρόνου ή του βάθους (εάν είναι γνωστή η ακουστική ταχύτητα) σε ένα σημείο του υπό έλεγχο δοκιμίου.



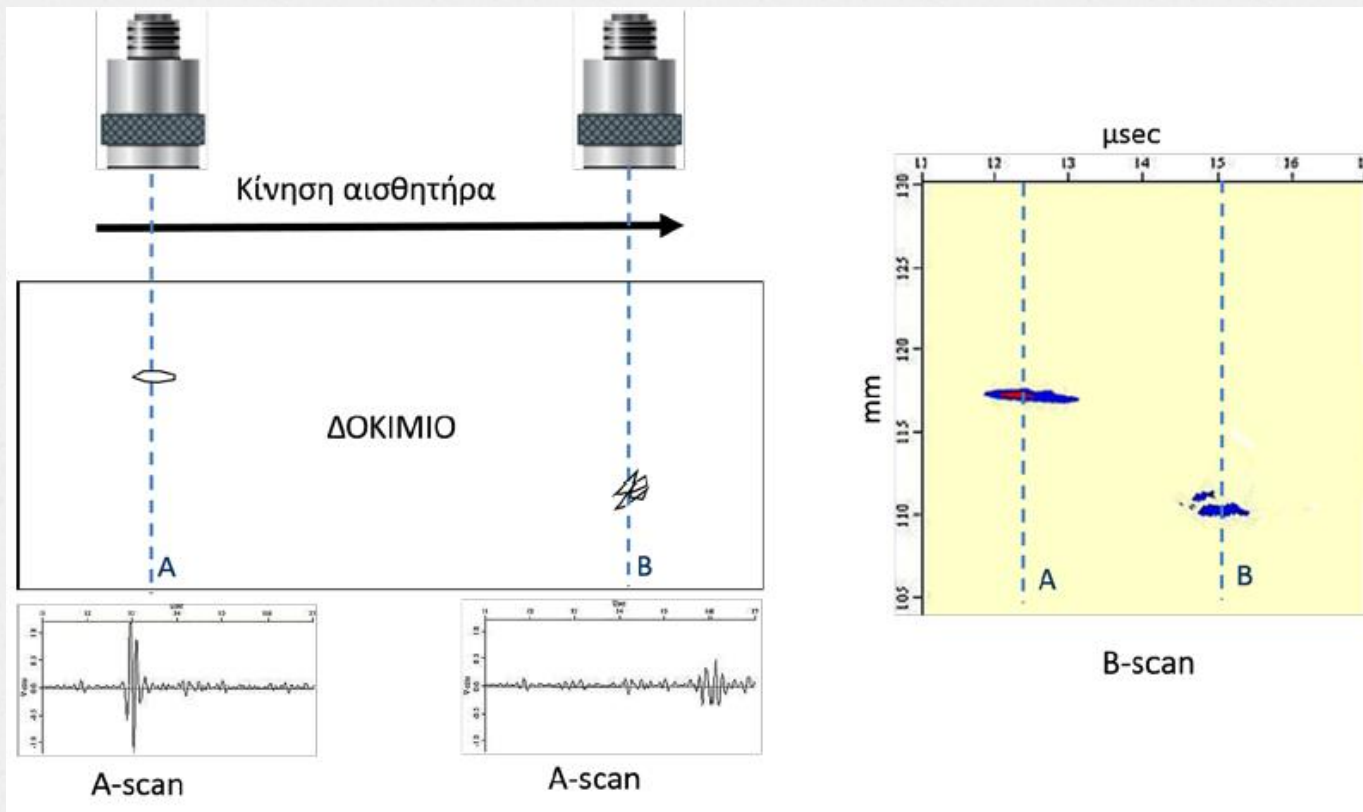
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων

Μια σειρά από A-scan που λαμβάνεται με σάρωση του αισθητήρα σε μια γραμμή κατά μήκος του δοκιμίου και η απεικόνιση των δεδομένων ως απόσταση συναρτήσει του χρόνου (ή του βάθους) ονομάζεται **B-scan**. Το B-scan παρουσιάζει το προφίλ μιας διατομής του υπό έλεγχο δοκιμίου. Στη απεικόνιση B-scan, ο χρόνος διάδοσης (time-of-flight) της ακουστικής ενέργειας απεικονίζεται στον κάθετο άξονα και η γραμμική θέση του αισθητήρα αναφορικά με το δοκίμιο απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα. Το βάθος ενός ανακλαστήρα, καθώς και οι γραμμικές του διαστάσεις στην κατεύθυνση σάρωσης μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα στην απεικόνιση Bscan.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων



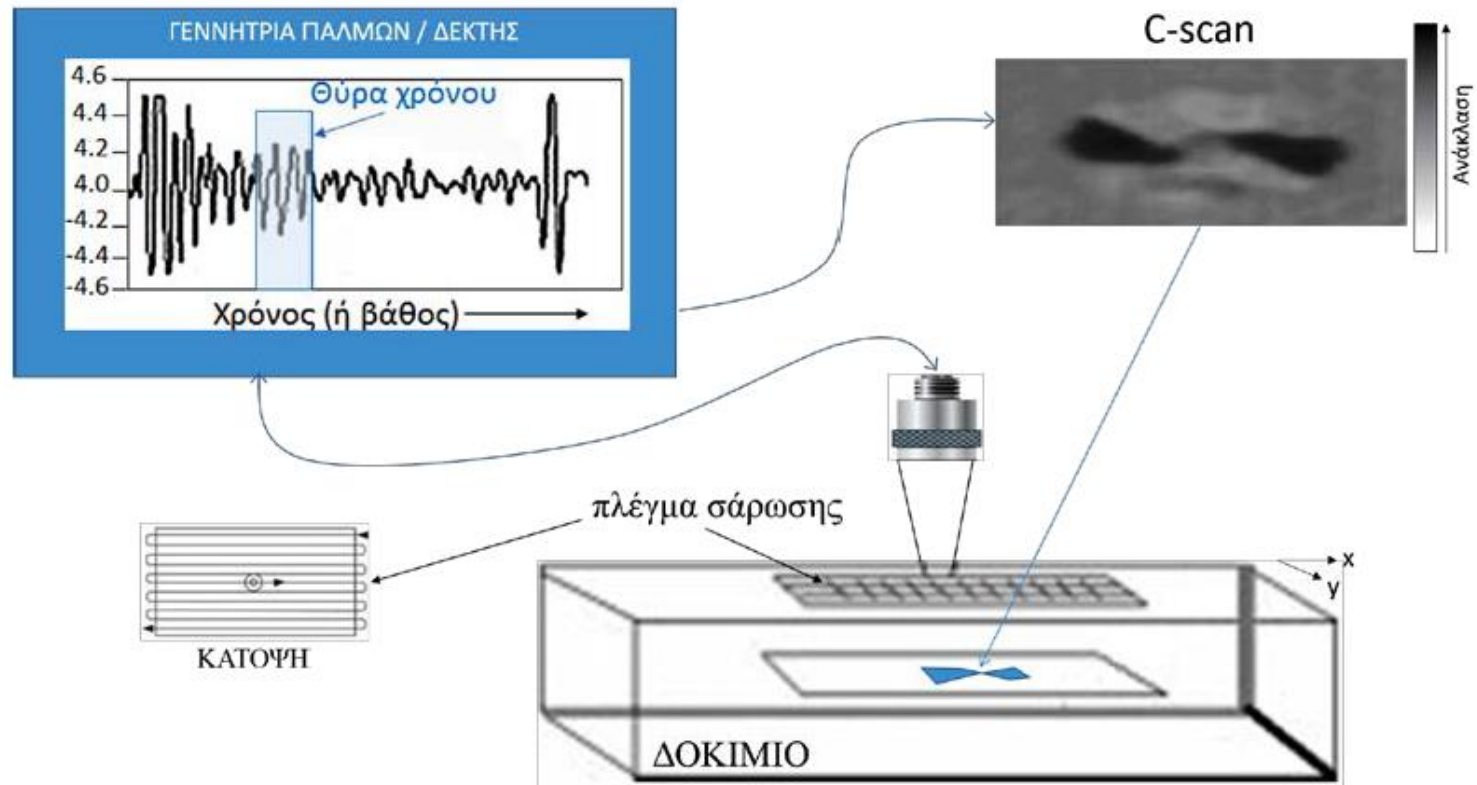
ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων

Όταν ο αισθητήρας κινείται σε ένα επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια του δοκιμίου και η μέγιστη τιμή του λαμβανόμενου σήματος σχεδιάζεται συναρτήσει της θέσης του αισθητήρα, τότε παράγεται μια εικόνα που ονομάζεται **C-scan**. Η παρουσίαση των δεδομένων με απεικόνιση C-scan παρέχει μια κάτοψη της κατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου, καθώς και της θέσης και του μεγέθους των εσωτερικών ασυνεχειών (οι οποίες ανακλούν ή σκεδάζουν τον υπέρηχο) σε ένα επίπεδο παράλληλο με το πλέγμα σάρωσης του αισθητήρα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους
Τεχνικές απεικόνισης των δεδομένων



ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων

Πλεονεκτήματα

- ο Μεγάλη διεισδυτική ικανότητα που επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος (μπορούν να ελεγχθούν αντικείμενα με μήκος και πάχος αρκετών μέτρων).
- ο Ακριβής προσδιορισμός της θέσης και μεγέθους εσωτερικών ατελειών και χαρακτηρισμός του προσανατολισμού, μορφής και τύπου τους.
- ο Τεχνική ευαίσθητη σε επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ασυνέχειες.
- ο Απαιτείται πρόσβαση σε μία μόνο επιφάνεια του υπό έλεγχο αντικειμένου.
- ο Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του αντικειμένου προς έλεγχο.
- ο Τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν πλήρη αυτοματοποίηση με δυνατότητα απεικόνισης υψηλής ευαισθησίας, παρέχοντας άμεσα αποτελέσματα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων

Πλεονεκτήματα

- ο Η υψηλή ευαισθησία της μεθόδου επιτρέπει την ανίχνευση πολύ μικρών ατελειών.
- ο Δυνατότητα ογκομετρικής ανίχνευσης, που επιτρέπει τον έλεγχο του συνολικού όγκου του αντικειμένου, που εκτείνεται από την εμπρός επιφάνεια ως την πίσω επιφάνειά του.
- ο Παρέχει τα αποτελέσματα σε μορφή ώστε να υπάρχει δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας για το χαρακτηρισμό ελαττωμάτων και βλάβης και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών.
- ο Φορητότητα.
- ο Κανένας κίνδυνος για την υγεία των χειριστών από τη χρήση της μεθόδου.
- ο Δεν απαιτούνται αναλώσιμα.

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθόδου των υπερήχων

Περιορισμοί-Μειονεκτήματα

- ο Δεν υπάρχει μόνιμη καταγραφή των δεδομένων, παρά μόνο όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ελέγχου.
- ο Τα αποτελέσματα του ελέγχου απαιτούν ερμηνεία (εξαιρούνται οι ψηφιακοί μετρητές πάχους τοιχώματος)
- ο Ο χειριστής της μεθόδου πρέπει να είναι ιδιαίτερα έμπειρος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ελέγχου.
- ο Η ανάπτυξη διαδικασιών ελέγχου απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις.
- ο Αντικείμενα που έχουν τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα, ή είναι πολύ μικρά σε μέγεθος ή έχουν πολύ λεπτή διατομή ή μη ομοιογενή, είναι δύσκολο να ελεγχθούν.
- ο Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι προσπελάσιμη για μετάδοση υπερήχων.
- ο Ασυνέχειες που υπάρχουν σε μικρό βάθος αμέσως κάτω από την επιφάνεια, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν.
- ο Είναι δύσκολος ο έλεγχος χονδρόκοκκων υλικών, όπως για παράδειγμα ο χυτοσίδηρος, εξαιτίας της μεγάλης εξασθένησης των υπερήχων και του υψηλού σήματος θορύβου στα υλικά αυτά.
- ο Γραμμικές ατέλειες προσανατολισμένες παράλληλα με τη δέσμη των υπερήχων μπορεί να μην ανιχνευτούν.
- ο Απαιτείται μέσο σύζευξης για την αποτελεσματική μεταφορά της ηχητικής ενέργειας στο δοκίμιο.
- ο Απαιτούνται πρότυπα αναφοράς τόσο για την βαθμονόμηση του εξοπλισμού όσο και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών.