

Κεφάλαιο 3

Ηλεκτρικές Μετρήσεις

Μέρος 1^ο: Ηλεκτρικές Μετρήσεις

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις βοηθούν στον προσδιορισμό διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, μέσω της χρήσης κατάλληλων μεθόδων και οργάνων. Συνεπώς, η πραγματοποίηση των ηλεκτρικών μετρήσεων βοηθάει στον έλεγχο των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και στη βελτίωση της απόδοσής τους.

3.1 Όργανα μέτρησης

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη λήψη των ηλεκτρικών μετρήσεων χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, αναλόγως της μεθόδου στην οποία βασίζονται για τη λήψη των μετρήσεων και του πεδίου χρήσης τους, αλλά και του συστήματος μέτρησης που χρησιμοποιούν.

Μια από τις κυριότερες μορφές διάκρισης των οργάνων μέτρησης, σχετίζεται με τον τρόπο καταγραφής και παρουσίασης της πληροφορίας που προέκυψε από τη μέτρηση. Βάσει αυτού του τρόπου διάκρισης, τα όργανα διαχωρίζονται σε αναλογικά και ψηφιακά. Θεωρητικά, τα αναλογικά όργανα μπορούν να αποδώσουν οποιαδήποτε τιμή που μετράται, λόγω του συνεχούς τρόπου μέτρησης (συνήθως αποτυπώνουν τις μετρήσεις μέσω της μετακίνησης μιας βελόνας πάνω σε μια βαθμονομημένη κλίμακα). Αντιθέτως, τα ψηφιακά όργανα βασίζονται στη δειγματοληψία, δηλαδή στη λήψη και απεικόνιση διακριτών τιμών, οι οποίες παρουσιάζονται σε μια οθόνη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα αναλογικά όργανα μέτρησης τείνουν να εκλείψουν, λόγω των μειονεκτημάτων που προκύπτουν από τον τρόπο λειτουργία τους (πολλά κινητά-μηχανικά μέρη, αυξημένη πιθανότητα αστοχίας των εξαρτημάτων τους, μεγαλύτερος όγκος του οργάνου, αυξημένα σφάλματα ανάγνωσης).

3.1.1 Σφάλματα οργάνων

Η εύρεση των σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την πραγματοποίηση και καταγραφή των ηλεκτρικών μετρήσεων, αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Τα σφάλματα διακρίνονται, αναλόγως με την προέλευσή τους, σε συστηματικά και σε τυχαία. Η κύρια αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι οι ατέλειες των οργάνων μέτρησης που προκύπτουν είτε από την κατασκευή τους είτε από την ελλιπή ρύθμισή τους. Τα σφάλματα αυτού του είδους επαναλαμβάνονται σε κάθε πραγματοποίηση μιας μέτρησης. Αντιθέτως, τα τυχαία σφάλματα προκύπτουν από άγνωστα αίτια, όπως είναι η λανθασμένη εκτίμηση της ένδειξης των οργάνων από τον παρατηρητή (σφάλματα ανάγνωσης).

3.1.2 Πολύμετρο

Το πολύμετρο είναι ένα αναλογικό ή ψηφιακό όργανο, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση διαφόρων μεγεθών, όπως είναι η ηλεκτρική τάση, το ηλεκτρικό ρεύμα, η αντίσταση ενός αντιστάτη, η χωρητικότητα ενός πυκνωτή, η αυτεπαγωγή ενός πηνίου, η θερμοκρασία κ.λπ.

Η κάθε μία από τις παραπάνω μετρήσεις μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της χρήσης επιμέρους οργάνων, όπως είναι το βολτόμετρο, το αμπερόμετρο, το ωμόμετρο κ.λπ.

3.1.3 Βολτόμετρο

Η μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης είναι δυνατή μέσω της χρήσης ενός βολτομέτρου. Η τάση που μετράται μπορεί να είναι συνεχής (DC) ή εναλλασσόμενη (AC). Για τη μέτρησή της, χρησιμοποιείται η κλίμακα των Volt. Στην περίπτωση της μέτρησης εναλλασσόμενης τάσης, η οποία δεν έχει κάποια σταθερή τιμή, το βολτόμετρο μετράει την RMS τιμή της τάσης.

Το βολτόμετρο πρέπει να συνδέεται παράλληλα με τα άκρα του κυκλώματος στα οποία πρέπει να μετρηθεί η τάση και έχει θεωρητικά άπειρη εσωτερική αντίσταση, ώστε να μην επηρεάζει το υπό μέτρηση ηλεκτρικό κύκλωμα.

3.1.4 Αμπερόμετρο

Ομοίως, με ένα αμπερόμετρο είναι δυνατόν να μετρηθεί η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, είτε εάν πρόκειται για συνεχές (DC), είτε για εναλλασσόμενο (AC) ηλεκτρικό ρεύμα. Για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιείται η κλίμακα των Ampere. Όπως και στην περίπτωση του βολτομέτρου, το αμπερόμετρο μετράει την RMS τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, όταν πρόκειται για εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Το αμπερόμετρο πρέπει να συνδέεται σε σειρά στα άκρα του κυκλώματος που πρόκειται να μετρηθεί και έχει θεωρητικά μηδενική αντίσταση, ώστε να μην επηρεάζει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό.

3.1.5 Λοιπά μετρητικά όργανα

Η μέτρηση των τιμών αντιστάσεων, πυκνωτών, πηνίων, διόδων και τρανζίστορ είναι, επίσης, δυνατή με τη χρήση πολυμέτρων ή άλλων εξειδικευμένων οργάνων (ωμομέτρων, καπασιτομέτρων κ.λπ.). Για τη μέτρηση αυτών των στοιχείων απαιτείται, αρχικά, η απομάκρυνσή τους από το κύκλωμα στο οποίο είναι συνδεδεμένα, ώστε να μην επηρεάζονται από αυτό. Στη συνέχεια, πρέπει να εναποτεθούν σε κάποια μη αγώγιμη σταθερή επιφάνεια, όπως είναι μια εργαστηριακή πλακέτα. Έπειτα, τοποθετούνται στα άκρα τους οι ακροδέκτες του οργάνου μέτρησης, με σκοπό τη λήψη και καταγραφή της μετρηθείσας τιμής.

3.1.5.1 Παλμογράφος

Ένα, ακόμη, πολύ χρήσιμο όργανο είναι ο παλμογράφος. Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό όργανο επιτρέπει την απεικόνιση ενός ηλεκτρικού σήματος σε μια οθόνη, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι, είναι δυνατή η προβολή του υπό μέτρηση σήματος συναρτήσει του χρόνου. Οι παλμογράφοι διακρίνονται σε αναλογικούς και ψηφιακούς, αναλόγως του τρόπου λειτουργίας τους, λήψης και απεικόνισης του λαμβανόμενου σήματος. Εκτός από την απλή απεικόνιση του σήματος, παρέχουν και πρόσθετες δυνατότητες, όπως είναι η οπτική μεγέθυνση ή μετατόπιση του απεικονιζόμενου σήματος ως προς τους άξονες των x και y , η μείωση του θορύβου του και η προβολή περισσοτέρων του ενός ηλεκτρικών σημάτων. Για την είσοδο του σήματος στον παλμογράφο, χρησιμοποιείται και σε αυτήν την περίπτωση καλώδιο με κατάλληλους ακροδέκτες.

3.1.5.2 Εργαστηριακή πλακέτα

Η εργαστηριακή πλακέτα επιτρέπει την εύκολη δημιουργία ηλεκτρικών κυκλωμάτων, μέσω της τοποθέτησης των στοιχείων των κυκλωμάτων σε αυτήν. Η εργαστηριακή πλακέτα περιλαμβάνει οριζόντιες και κάθετες οπές. Κάθε ζώνη με κάθετες οπές είναι

βραχυκυκλωμένη, δηλαδή διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα. Συνεπώς, τα άκρα των κυκλωμάτων που θα συνδεθούν στις οπές της ίδιας κάθετης ζώνης, θεωρούνται ενωμένα. Αντιθέτως, οι οπές δεν συνδέονται μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση. Έτσι, είναι δυνατή, μέσω της κατάλληλης τοποθέτησης, η σύνδεση των διαφόρων εξαρτημάτων εν σειρά ή εν παραλλήλω, αναλόγως με τις απαιτήσεις του κάθε κυκλώματος.

Μέρος 2^ο: Ηλεκτρονικοί Αισθητήρες

Με τον όρο αισθητήρες περιγράφονται όλες εκείνες οι συσκευές που μετρούν μια φυσική ποσότητα και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό -συνήθως- σήμα.

Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των αισθητήρων, τρεις από τους οποίους αναφέρονται στη συνέχεια. Ο πρώτος αφορά το τι μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας με πιο σημαντική διάκριση αυτή μεταξύ των φυσικών και χημικών αισθητήρων. Οι φυσικοί αισθητήρες ελέγχουν φυσικά μεγέθη όπως θέση, μάζα, ρεύμα, χρόνο και σχετικά τους μεγέθη ενώ οι χημικοί ελέγχουν την παρουσία διαφορετικών αερίων σε συγκεκριμένη ατμόσφαιρα.

Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τα υλικά στις φυσικές ιδιότητες των οποίων βασίζεται η λειτουργία του αισθητήρα, με κύριες κατηγορίες τους αισθητήρες με αγωγή, ημιαγωγή, διηλεκτρικά, μαγνητικά και υπεραγωγή υλικά.

Τέλος η τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης αναφέρεται στη χρήση του αισθητήρα με σημαντικότερες κατηγορίες τους βιομηχανικούς, τους ιατρικούς, στρατιωτικούς, περιβαλλοντικούς αισθητήρες καθώς και τους αισθητήρες μεταφοράς και αυτοματισμού.

3.2 Χαρακτηριστικά των αισθητήρων

Αυτές οι διατάξεις που περιγράφηκαν αποτελούν τις πιο ευρέως διαδεδομένες συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μετατόπισης. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία κάθε αισθητήρα καθορίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζει αυτός απέναντι στις υπόλοιπες αισθητήριες διατάξεις. Για την επιλογή του κατάλληλου οργάνου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, σημασία έχει η γνώση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα που αποτυπώνουν την απόδοση και τη συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα σημαντικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά για τα γεωτεχνικά όργανα περιγράφονται στη συνέχεια.

- Συμβατότητα
- Εύρος λειτουργίας
- Αβεβαιότητα
- Ακρίβεια
- Επαναληψιμότητα
- Διακριτότητα
- Ευαισθησία
- Υστέρηση
- Θόρυβος
- Διαστάσεις
- Γραμμικότητα

Η *συμβατότητα* είναι ένα μέγεθος που περιγράφει κατά πόσον η εγκατάσταση του οργάνου θα επηρεάσει την τιμή της παραμέτρου που πρόκειται να μετρήσει. Ιδανικό από άποψη συμβατότητας θεωρείται ένα όργανο που δεν την επηρεάζει καθόλου.

Το *εύρος λειτουργίας* ενός αισθητήρα ορίζεται από τα όρια, εντός των οποίων μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα. Συνήθως, εκφράζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει. Επιπλέον, ως εύρος λειτουργίας αναφέρεται το θερμοκρασιακό εύρος, το εύρος τιμών πίεσης ή το εύρος τιμών υγρασίας, εννοώντας την περιοχή τιμών θερμοκρασίας, πίεσης ή υγρασίας αντίστοιχα, στην οποία είναι δυνατή η χρήση του αισθητήρα.

Η *ακρίβεια* ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να περιέχεται στην ένδειξή του. Στην πράξη όλες οι συσκευές παράγουν σφάλμα στις μετρήσεις τους και το ζητούμενο είναι αυτό το σφάλμα να είναι το μικρότερο δυνατό.

Επαναληψιμότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο μια συσκευή παρέχει το ίδιο αποτέλεσμα τροφοδοτούμενος με την ίδια είσοδο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η *διακριτότητα* ή *διακριτική ικανότητα* ενός αισθητήρα καθορίζεται από το μικρότερο διάστημα που μπορεί να μετρηθεί από αυτόν. Όσο μεγαλύτερη διακριτότητα διαθέτει μία αισθητήρια διάταξη, τόσο μικρότερο βήμα μετράει.

Η *ευαισθησία* ενός οργάνου είναι η ελάχιστη μεταβολή της εισόδου του που είναι σε θέση να δώσει μεταβολή στην έξοδό του.

Η *υστέρηση* προκαλεί διαφορές στην έξοδο ενός αισθητήρα όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Έτσι παράγεται σφάλμα και επηρεάζεται η ακρίβεια της συσκευής.

Θόρυβος δημιουργείται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως γειννίαση με πηγές τάσης υψηλής συχνότητας, πηγές εκπομπής ήχου κ.α.. Η βάση λειτουργίας κάθε αισθητήρα καθορίζει κατά πόσον επηρεάζεται η ακρίβειά του και η διακριτότητά του λόγω θορύβου.

Οι *διαστάσεις* ενός αισθητήρα αναφέρονται στο μέγεθός του.

Γραμμικότητα ονομάζεται ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός για μια περιοχή τιμών.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται δεν μπορούν συνήθως να συνδυάσουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε ικανοποιητικά επίπεδα για το χρήστη. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να διαθέτει μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία, αλλά να έχει υψηλό κόστος. Ένας τέτοιος αισθητήρας επιδεικνύει ικανοποιητικές επιδόσεις στα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν και μάλιστα δεν έχει υψηλό κόστος λόγω των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή του.

3.3 Αρχές λειτουργίας των Αισθητήρων

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν μερικά από τα βασικά φαινόμενα που χρησιμοποιούνται ως αρχές λειτουργίας των αισθητήρων.

3.3.1 Φαινόμενα σε αγωγούς

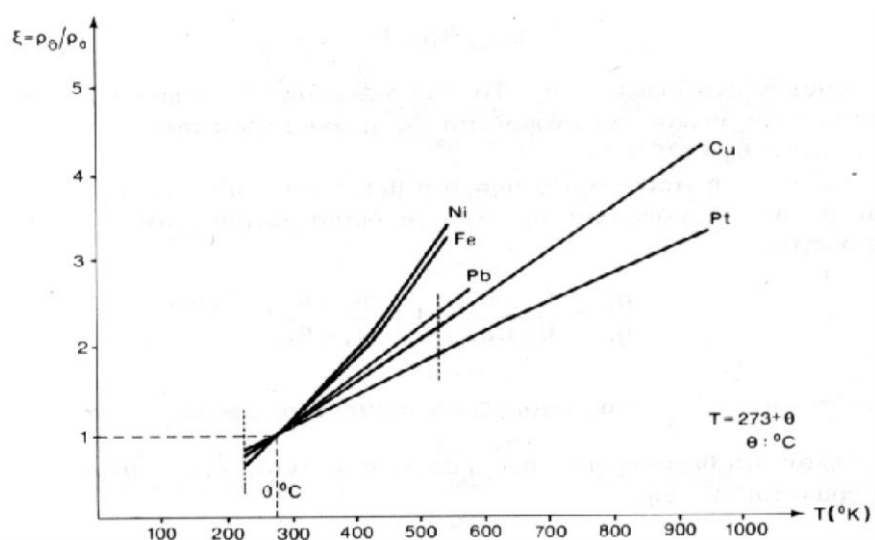
3.3.1.1 Επίδραση της θερμοκρασίας

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, η ελεύθερη μέση διαδρομή μειώνεται, η ευκινησία των ηλεκτρονίων μειώνεται και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται (**Σχήμα 3.1**), σύμφωνα με τη σχέση:

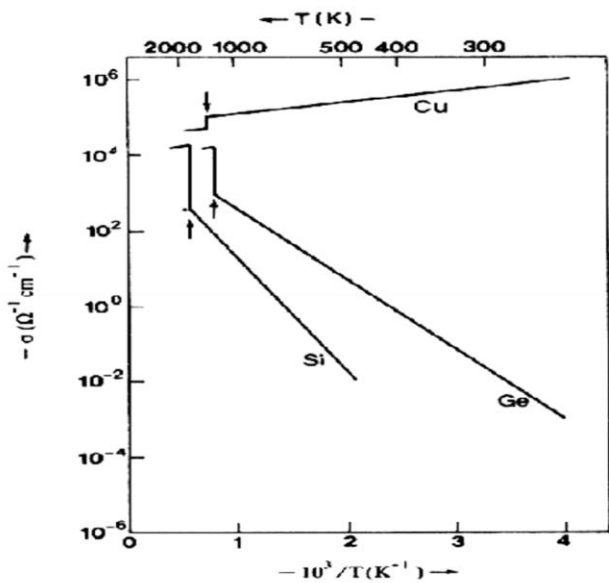
$$\rho = \rho_{20^{\circ}\text{C}} (1 + a \Delta T) \quad (3.1)$$

όπου $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στους 20°C , ΔT η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας που ζητείται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και της θερμοκρασίας των 20°C και a ο θερμικός συντελεστής διαστολής.

Σε ορισμένα μέταλλα, όπως το βηρύλιο, ο χαλκός (**Σχήμα 3.2**) και το αλουμίνιο, όταν βρίσκονται σε πολύ καθαρή κατάσταση, η αγωγιμότητα αυξάνει με ιδιαίτερα έντονο ρυθμό με τη μείωση της θερμοκρασίας (κρυσταλλοί). Κάποια άλλα σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες έχουν την ιδιότητα να αποκτούν απεριόριστη αγωγιμότητα (υπεραγωγοί). Τέτοια μέταλλα ή διμεταλλικές ενώσεις είναι ο μόλυβδος, το νιόβιο και κράματά του όπως το Nb_3Sn . Στους ημιαγωγούς, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας.



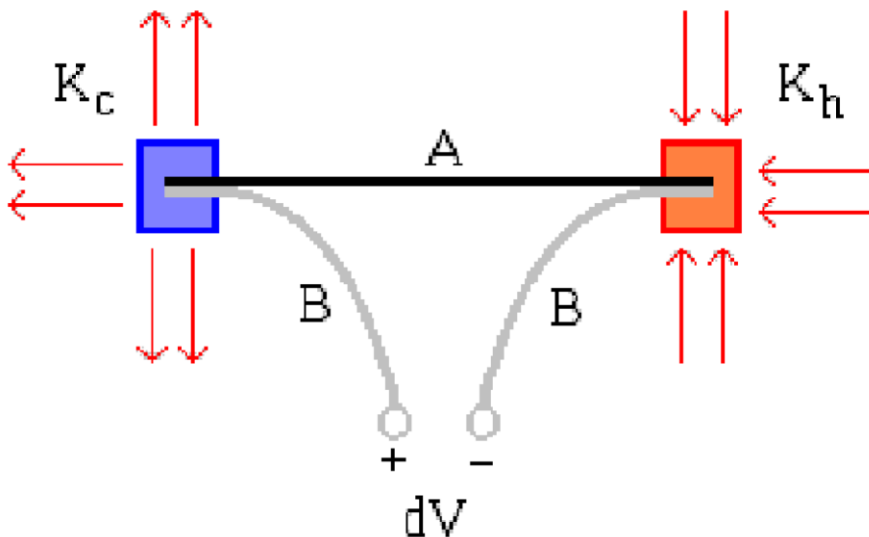
Σχήμα 3.1 Η ειδική αντίσταση συναρτήσει της θερμοκρασίας διαφόρων μετάλλων.



Σχήμα 3.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του Cu και των ημιαγωγών Ge, Si. Τα βέλη δείχνουν τα σημεία τήξης των σωμάτων.

3.3.1.2 Το Φαινόμενο Seebeck

Ένα άλλο φαινόμενο πάνω στο οποίο μπορεί να βασιστεί η κατασκευή ενός αισθητήρα μετατόπισης - και όχι μόνο - είναι το φαινόμενο Seebeck. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που έκανε ο Thomas J. Seebeck το 1821, στα άκρα ενός ανοικτού κυκλώματος από ζεύγος δύο ανόμοιων μετάλλων A και B, των οποίων τα σημεία σύνδεσης διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό δυναμικό. Στο **Σχήμα 3.3** φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου.



Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Seebeck.

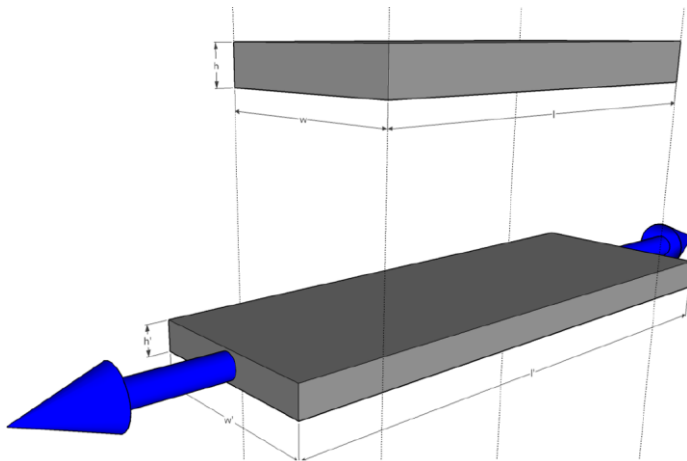
Η διαφορά δυναμικού που παράγεται είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασιών $K_h - K_c$ στα προαναφερόμενα σημεία σύνδεσης και δεν εξαρτάται καθόλου από την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της σύνδεσης μεταξύ των μετάλλων:

$$dV = S_{AB} (K_h - K_c) \quad (3.2)$$

Ο συντελεστής S_{AB} ονομάζεται σχετικός συντελεστής Seebeck, θερμοηλεκτρική ισχύς ή απλά θερμοϊσχύς του ζεύγους μετάλλων. Ο συντελεστής Seebeck μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο. Αν το κύκλωμα είναι κλειστό, τα μέταλλα διαρρέονται από ρεύμα που μπορεί να ανιχνευθεί από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από το σύρμα, από τη θέρμανση του σύρματος λόγω αντίστασης ή με ένα γαλβανόμετρο ή αμπερόμετρο τοποθετημένο στο κύκλωμα.

Παράδειγμα 3.1

Στον αισθητήρα strain gauge του σχήματος ασκούνται εφελκυστικές δυνάμεις, τέτοιες ώστε να παραμένει στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η αντίστασή του R . Αν η αύξηση του αρχικού του μήκους $l=10\text{mm}$ κατά τον άξονα που ασκούνται οι δυνάμεις είναι ίση με $\delta l=0,2\text{mm}$, να υπολογιστεί η απόδοση του αισθητήρα (Gauge Factor).



Σχήμα 3.4 Ο αισθητήρας strain gauge πριν και μετά την άσκηση των εφελκυστικών δυνάμεων.

Απάντηση

Η απόδοση ενός αισθητήρα strain gauge, δίδεται από τον τύπο:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\delta l}{l}}$$

Η αρχική αντίσταση του αισθητήρα ισούται με:

$$R(0) = \rho \frac{l}{S}$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του αισθητήρα, l το αρχικό του μήκος και $S = h \cdot w$ το αρχικό εμβαδόν των εδρών του που είναι κάθετες στον άξονα του εφελκυσμού. Η τελική αντίσταση του αισθητήρα, μετά την άσκηση των εφελκυστικών δυνάμεων, θα είναι:

$$R(F) = \rho' \frac{l'}{S'}$$

όπου ρ' είναι η ειδική αντίσταση του αισθητήρα, l' το τελικό του μήκος και $S' = h' \cdot w'$ το τελικό εμβαδόν των εδρών του που είναι κάθετες στον άξονα του εφελκυσμού. Οπότε:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(F) - R(0)}{R(0)} = \frac{R(F)}{R(0)} - 1 = \frac{\rho' \frac{l'}{S'}}{\rho \frac{l}{S}} - 1$$

Επειδή η ειδική αντίσταση εξαρτάται από το υλικό του αισθητήρα, το οποίο δεν μεταβάλλεται κατά τον εφελκυσμό, έχουμε:

$$\rho' = \rho$$

Άρα:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho \frac{l'}{S'}}{\rho \frac{l}{S}} - 1 = \frac{l'}{S'} - 1$$

Λόγω της άσκησης εφελκυστικών δυνάμεων στον αισθητήρα, το μήκος του l θα αυξηθεί κατά δl και το εμβαδόν των εδρών του S θα μειωθεί κατά δS . Συνεπώς:

$$l' = l + \delta l$$

$$S' = S - \delta S$$

Έτσι, αντικαθιστώντας τα l' και S' προκύπτει:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{l + \delta l}{S - \delta S} - 1$$

Επειδή ο όγκος V του αισθητήρα θα παραμείνει σταθερός, ισχύει:

$$V = V' \Leftrightarrow l \cdot S = l' \cdot S' \Leftrightarrow l \cdot S = (l + \delta l) \cdot (S - \delta S) \Leftrightarrow S - \delta S = \frac{l \cdot S}{l + \delta l}$$

Άρα:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\frac{l + \delta l}{l \cdot S}}{\frac{l}{S}} - 1 = \frac{\frac{(l + \delta l)^2}{l \cdot S}}{\frac{l}{S}} - 1 = \frac{(l + \delta l)^2}{l} - 1 = \left(\frac{l + \delta l}{l} \right)^2 - 1 = \left(1 + \frac{\delta l}{l} \right)^2 - 1$$

Οπότε, για $l = 10mm$ και $\delta l = 0,2mm$ έχουμε:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(1 + \frac{0,2}{10} \right)^2 - 1 = 0,0404$$

Συνεπώς:

$$GF = \frac{0,0404}{\frac{0,2}{10}} = 2,02$$

3.3.2 Φαινόμενα σε ημιαγωγούς

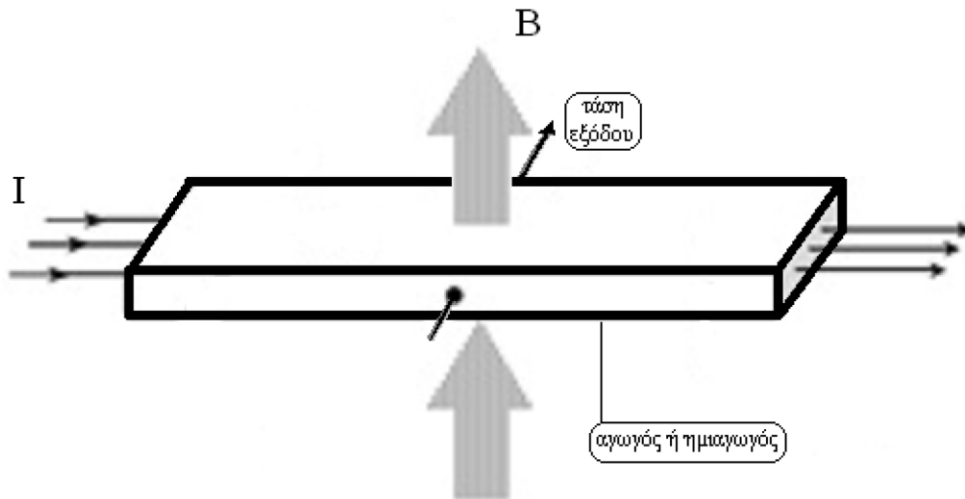
3.3.2.1 Το Φαινόμενο Hall

Αν ένας αγωγός, που διαρρέεται από ρεύμα, βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε ασκείται μία εγκάρσια δύναμη στα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Η δύναμη τείνει να σπρώξει το ηλεκτρικό φορτίο στο ένα άκρο του αγωγού. Έτσι παράγεται μια μετρήσιμη τάση στα άκρα του αγωγού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.5**. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τον Ε. Η. Hall το 1879.

Οι ανιχνευτές προσέγγισης που στηρίζονται στο φαινόμενο Hall λειτουργούν μέσω μαγνητικής αλληλεπίδρασης. Συνήθως χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί, επειδή το φαινόμενο είναι πιο έντονο σε αυτούς. Οι διάταξή τους αποτελείται από ένα μικρό ολοκληρωμένο κύκλωμα ενσωματωμένο σε μία βελόνα δοκιμής, η οποία ανιχνεύει με ακρίβεια την κίνηση αντικειμένων από κράμα σιδήρου.

Η χρήση τους είναι αντίστοιχη με αυτή των ανιχνευτών προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αλλά είναι πιο ακριβοί από αυτούς. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο που επιδεικνύουν είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο των ανιχνευτών προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Υπάρχουν αρκετές συσκευές που στηρίζονται στο φαινόμενο Hall. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι βαλβίδες φαινομένου Hall, οι αισθητήρες ρεύματος φαινομένου Hall και οι αισθητήρες έντασης μαγνητικού πεδίου φαινομένου Hall.



Σχήμα 3.5 Φαινόμενο Hall.

3.3.3 Φαινόμενα σε διηλεκτρικά υλικά

Τα διηλεκτρικά υλικά έχουν ένα μεγάλο ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας. Συνεπώς αυτά τα υλικά έχουν υψηλή ειδική αντίσταση. Τα διηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται ως μονωτικά στοιχεία και πυκνωτές. Σε όλα τα διηλεκτρικά υλικά, η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου είναι η αιτία της δημιουργίας και της κίνησης διπόλων. Αυτά τα δίπολα είναι άτομα ή ομάδες ατόμων οι οποίες έχουν ένα ηλεκτρικό φορτίο σε κατάσταση μη ισορροπίας. Υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου τα δίπολα ευθυγραμμίζονται μέσα στο διηλεκτρικό υλικό που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της πολωσιμότητας.

3.3.3.1 Πολωσιμότητα

Η πόλωση P (C/m²) σε ένα διηλεκτρικό υλικό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{p}{V} \quad (3-3)$$

Η διπολική ροπή ορίζεται ως:

$$p = Zqd \quad (3-4)$$

όπου Z είναι ο αριθμός των φορτίων που μετατοπίζονται ανά κυβικό μέτρο, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και d είναι η απόσταση μεταξύ θετικού και αρνητικού φορτίου στο δίπολο. Η πολωσιμότητα a ενός ατόμου ορίζεται σα συνάρτηση του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου στο άτομο:

$$p = aE_{τοπ} \quad (3-5)$$

Η πολωσιμότητα είναι μια ατομική ιδιότητα, η διηλεκτρική σταθερά όμως θα εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο συγκεντρώνονται για να σχηματίσουν ένα κρύσταλλο. Η πόλωση

ενός κρυστάλλου μπορεί να εκφραστεί προσεγγιστικά σαν το γινόμενο των πολωσιμοτήτων των ατόμων επί το τοπικό πεδίο:

$$P = \sum_j N_j p_j = \sum_j N_j a_j E_{\text{τοπ}(j)} \quad (3-6)$$

όπου N_j είναι η συγκέντρωση και a_j η πολωσιμότητα των ατόμων j , και $E_{\text{τοπ}(j)}$ είναι το τοπικό πεδίο στις ατομικές θέσεις j . Η ολική πολωσιμότητα μπορεί συνήθως να χωριστεί σε τρία μέρη: ηλεκτρονική, ιοντική και διπολική.

Η ιοντική συνεισφορά προκύπτει από τη μετατόπιση ενός φορτισμένου ιόντος σε σχέση με τα άλλα ιόντα. Η διπολική πολωσιμότητα προκύπτει από μόρια με μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή που μπορούν να αλλάξουν προσανατολισμό σ' ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Σ' ετερογενή υλικά υπάρχει συνήθως και μια ενδιάμεση πόλωση που προκύπτει από τη συσσώρευση φορτίου στις δομικές ενδιάμεσες επιφάνειες. Αυτό έχει μικρό στοιχειώδες ενδιαφέρον, έχει όμως σημαντικό πρακτικό ενδιαφέρον γιατί τα εμπορικά μονωτικά υλικά είναι συνήθως ετερογενή.

Η διηλεκτρική σταθερά των οπτικών συχνοτήτων προκύπτει σχεδόν αποκλειστικά από την ηλεκτρονική πολωσιμότητα. Η διπολική και η ιοντική συνεισφορά είναι μικρές στις υψηλές συχνότητες λόγω της αδράνειας των μορίων των ιόντων. Η ηλεκτρονική πολωσιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από το είδος του ιόντος αλλά εξαρτάται κάπως και από το περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται. Τα αρνητικά ιόντα έχουν πολωθεί γιατί είναι πολύ μεγάλα.

Κλασική θεωρία της Ηλεκτρονικής Πολωσιμότητας. Ένα ηλεκτρόνιο δέσμιο αρμονικά σ' ένα άτομο θα δείξει απορρόφηση συντονισμού σε μια συχνότητα $\omega_0 = (\beta/m)^{1/2}$, όπου β είναι η σταθερά της δύναμης. Η μετατόπιση x του ηλεκτρονίου που προκαλείται από την εφαρμογή ενός πεδίου $E_{\text{τοπ}}$ δίνεται από τη σχέση:

$$-eE_{\text{τοπ}} = \beta x = m\omega_0^2 x \quad (3-7)$$

Έτσι ώστε η στατική ηλεκτρονική πολωσιμότητα είναι:

$$a(\text{ηλεκτρονική}) = \frac{p}{E_{\text{τοπ}}} = -ex/E_{\text{τοπ}} = \frac{e^2}{m\omega_0^2} \quad (3-8)$$

Η ηλεκτρονική πολωσιμότητα θα εξαρτάται από τη συχνότητα.

Διηλεκτρική σταθερά. Τα άτομα σε μονωτές ταλαντώνονται κάτω από την επίδραση ενός εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, και αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να εκφραστούν με τη διηλεκτρική σταθερά ϵ . Η διηλεκτρική σταθερά ϵ ενός ισотροπικού μέσου ή κυβικού μέσου ως προς το κενό ορίζεται σα συνάρτηση του μακροσκοπικού πεδίου E :

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 E + P}{\epsilon_0 E} \quad (3-9)$$

3.3.3.2 Πιεζοηλεκτρισμός

Ο πιεζοηλεκτρισμός, ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε μία επιλεγμένη ομάδα υλικών, ανακαλύφθηκε το 1880 από το Jacques και Pierre Curie κατά τη συστηματική έρευνά τους στο αποτέλεσμα της πίεσης πάνω σε κρυστάλλους όπως ο χαλαζίας, που δημιουργεί ηλεκτρική φόρτιση στα άκρα αυτών των κρυστάλλων. Συνεπώς πιεζοηλεκτρισμός είναι η δημιουργία ηλεκτρισμού ως συνέπεια μηχανικής πίεσης. Σύμφωνα με ένα άλλο ορισμό πιεζοηλεκτρισμός είναι: ηλεκτρική πόλωση παραγόμενη από μηχανική τάση που ασκείται σε κρυστάλλους που ανήκουν σε συγκεκριμένες τάξεις. Η πόλωση είναι ανάλογη με την τάση και αλλάζει διεύθυνση σύμφωνα με αυτή.

Για να γίνει κατανοητός ο λόγος ύπαρξης του πιεζοηλεκτρισμού στα στερεά πρέπει να γίνει κατανοητή η εσωτερική δομή των υλικών, που στην περίπτωση μας συνίστανται από κρυστάλλους. Αυτοί οι κρύσταλλοι έχουν συγκεκριμένη χημική σύνθεση και αποτελούνται από ιόντα τα οποία είναι δεσμευμένα να καταλαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις, εναλλάσσονται μεταξύ τους με προκαθορισμένο τρόπο και επαναληψιμότητα, και δομούν το κρυσταλλικό πλέγμα του. Η μικρότερη επαναλαμβανόμενη μονάδα του πλέγματος ονομάζεται κυψελίδα. Η ύπαρξη συμμετρίας στην κυψελίδα προσδιορίζει αν ο κρύσταλλος είναι ικανός για πιεζοηλεκτρισμό ή όχι. Επιπλέον, η συμμετρία στην εσωτερική δομή του κρυστάλλου αντανακλάται στη συμμετρία των εξωτερικών του ιδιοτήτων.

Τα στοιχεία συμμετρίας στις κυψελίδες είναι: (1) ένα κέντρο συμμετρίας, (2) άξονες συμμετρίας, (3) επίπεδα συμμετρίας, (4) συνδυασμός αυτών των 3. Όλοι οι κρύσταλλοι μπορούν να διαιρεθούν σε 32 διαφορετικές τάξεις σύμφωνα με τα στοιχεία συμμετρίας τους. Αυτές οι 32 ομάδες είναι υποδιαιρέσεις από 7 βασικά συστήματα, τα οποία είναι: το τρίκλινες, το μονοκλινές, το ορθορομβικό, το τετραγωνικό, το ρομβοεδρικό (τριγωνικό), εξαγωνικό και κυβικό. Από τις 32 αυτές ομάδες, 21 δεν έχουν συμμετρία κέντρου (μια αναγκαία κατάσταση για την ύπαρξη πιεζοηλεκτρισμού) και 20 από αυτές είναι πιεζοηλεκτρικές.

Crystal Structure	Point Groups	Centro-Symmetric	Non-centrosymmetric	
			Piezoelectric	Pyroelectric
Triclinic	1, $\bar{1}$	$\bar{1}$	1	1
Monoclinic	2, m, 2/m	2/m	2, m	2, m
Orthorhombic	222, mm2, mmm	mmm	222, mm2	mm2,
Tetragonal	4, $\bar{4}$, 4/m, 422, 4mm, $\bar{4}2m$, (4/m)mm	4/m, (4/m)mm	4, $\bar{4}$, 422, 4mm, $\bar{4}2m$	4, 4mm
Trigonal	3, $\bar{3}$, 32, 3m, $\bar{3}m$	$\bar{3}$, $\bar{3}m$	3, 32, 3m	3, 3m
Hexagonal	6, $\bar{6}$, 6/m, 622, 6mm, $\bar{6}m2$, (6/m)mm	6/m, (6/m)mm	6, $\bar{6}$, 622, 6mm, $\bar{6}m2$	6, 6mm
Cubic	23, m3, 432, $\bar{4}3m$, m3m	m3, m3m	23, $\bar{4}3m$	-----

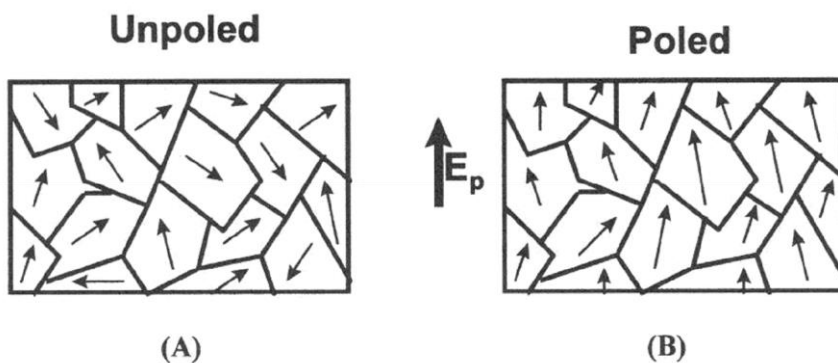
Πίνακας 3.1 Τα κρυσταλλικά συστήματα και οι συμμετρίες τους.

Μία τάξη, παρόλο που δεν έχει συμμετρία κέντρου, εμφανίζει πιεζοηλεκτρισμό, εξαιτίας του συνδυασμού των άλλων στοιχείων συμμετρίας. Η έλλειψη κέντρου συμμετρίας είναι απαραίτητη για την ύπαρξη πιεζοηλεκτρισμού, όταν θεωρήσουμε ότι μία ομοιόμορφη τάση εφαρμόζεται σε έναν κρύσταλλο με συμμετρία κέντρου, δεν είναι δυνατόν να έχουμε πόλωση, άρα δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του σιδηροηλεκτρισμού, ενώ όταν δεν υπάρχει συμμετρία, οπότε με την ύπαρξη τάσης, έχουμε μετακίνηση των ιόντων στο πλέγμα, και

συνεπώς δημιουργία πόλωσης. Ωστόσο για τα υλικά που είναι πιεζοηλεκτρικά αλλά δεν είναι σιδηροηλεκτρικά (δεν έχουν αυθόρμητη πόλωση) η τάση είναι ο μόνος λόγος για τη δημιουργία των διπόλων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαδικασία πόλωσης είναι το κρίσιμο στοιχείο για τη δημιουργία πιεζοηλεκτρισμού σε ένα σιδηροηλεκτρικό κεραμικό. Χωρίς την πόλωση, το κεραμικό είναι αδρανές, παρόλο που κάθε κρύσταλλος του χωριστά είναι πιεζοηλεκτρικός. Με την πόλωση, ωστόσο, το κεραμικό γίνεται εξαιρετικά χρήσιμο, με την προϋπόθεση ότι δεν είναι σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία Curie, όπου χάνει την πόλωσή του και τον προσανατολισμό της πόλωσης.

Δύο φαινόμενα είναι λειτουργικά στους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους γενικά, και στα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά, ειδικότερα. Το άμεσο αποτέλεσμα (που σχεδιάζεται ως γεννήτρια) είναι το φαινόμενο όπου ηλεκτρική τάση (πόλωση) δημιουργείται από μηχανική τάση και το αντίστροφο αποτέλεσμα (που σχεδιάζεται ως κινητήρας) σχετίζεται με τη δημιουργία μηχανικής τάσης λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 3.6 Διαδικασία πόλωσης στα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά: (Α) Σε απουσία ηλεκτρικού πεδίου οι περιοχές έχουν τυχαίο προσανατολισμό πόλωσης (Β) Η πόλωση στις περιοχές ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν αυτά τα δύο φαινόμενα είναι:

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk} \text{ (Generator)} \quad (3-10)$$

$$\varepsilon_{ij} = d_{kij} E_k \text{ (Motor)} \quad (3-11)$$

Όπου P_i είναι η πόλωση που δημιουργείται στον άξονα i σαν αποτέλεσμα της εφαρμογής τάσης σ_{jk} , και d_{kij} είναι ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής. Για το αντίστροφο αποτέλεσμα, ε_{ij} είναι η μηχανική τάση που δημιουργείται σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση του κρυστάλλου λόγω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου E_i στον άξονα i .

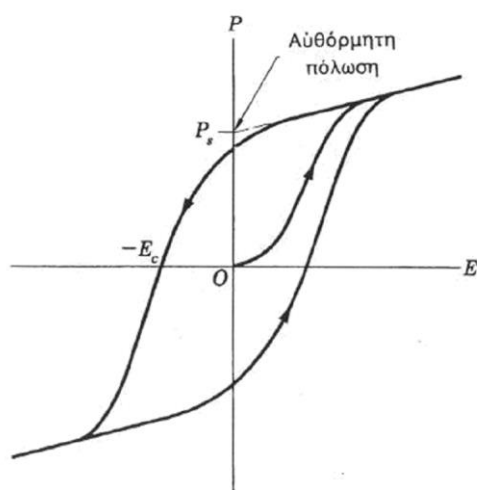
3.3.3.3 Σιδηροηλεκτρικοί Κρύσταλλοι

Ένας σιδηροηλεκτρικός κρύσταλλος παρουσιάζει μία ηλεκτρική διπολική ροπή ακόμη και όταν δεν επιβάλλεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Στη σιδηροηλεκτρική κατάσταση το κέντρο του θετικού φορτίου του κρυστάλλου δε συμπίπτει με το κέντρο του αρνητικού φορτίου.

Ο βρόχος ονομάζεται βρόχος υστέρησης και είναι ένας χαρακτήρας της σιδηροηλεκτρικής κατάστασης. Ένας κρύσταλλος σε μια κανονική διηλεκτρική κατάσταση

συνήθως δε παρουσιάζει αισθητή υστέρηση όταν το πεδίο αυξάνεται και αντιστρέφεται αργά. Σε μερικούς κρυστάλλους η σιδηροηλεκτρική διπολική ροπή μπορεί να μην αλλάζει από ένα ηλεκτρικό πεδίο με μέγιστη ένταση που μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να προκαλέσει ηλεκτρική κατάρρευση του κρυστάλλου. Στους κρυστάλλους συχνά παρατηρούμαι μια αλλαγή στην αυθόρμητη ροπή όταν θερμαίνονται: αλλάζοντας τη θερμοκρασία αλλάζει η τιμή της διπολικής ροπής. Τέτοιοι κρύσταλλοι ονομάζονται πυροηλεκτρικοί, ενώ οι κρύσταλλοι στους οποίους η διεύθυνση της αυθόρμητης ροπής μπορεί να αλλάζει από ένα ηλεκτρικό πεδίο ονομάζονται σιδηροηλεκτρικοί. Το νιοβικό λίθιο LiNbO_3 , είναι πυροηλεκτρικό στη θερμοκρασία δωματίου, έχει μεγάλη θερμοκρασία μετάβασης ($T_c=1470\text{K}$) και πολύ μεγάλη πόλωση κορεσμού. Μπορεί να του δοθεί παραμένονσα πόλωση μόνο από ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται πάνω από τους 1000°C .

Ο σιδηροηλεκτρισμός συνήθως εξαφανίζεται πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία μετάβασης. Πάνω από τη μετάβαση ο κρύσταλλος θεωρείται ότι είναι σε μια παραηλεκτρική κατάσταση. Ο όρος παραηλεκτρική προϋποθέτει μια αναλογία με τον παραμαγνητισμό και δίνει μια γρήγορη ελάττωση της διηλεκτρικής σταθεράς όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.



Σχήμα 3.7 Καμπύλη σιδηροηλεκτρικής υστέρησης πόλωσης-πεδίου.

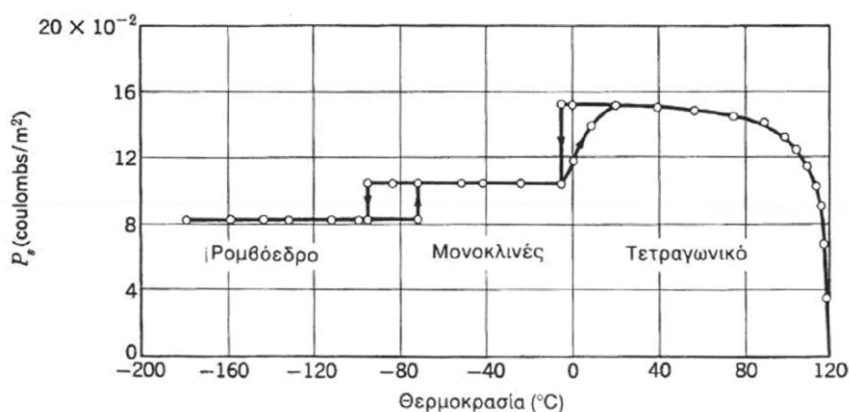
Ταξινόμηση των Σιδηροηλεκτρικών κρυστάλλων. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται μερικούς από τους κρυστάλλους που θεωρούνται ότι είναι σιδηροηλεκτρικοί, με τη θερμοκρασία μετάβασης ή το σημείο Curie T_c στο οποίο ο κρύσταλλος αλλάζει από την πολωμένη κατάσταση χαμηλής θερμοκρασίας στη μη πολωμένη κατάσταση της υψηλής θερμοκρασίας. Η θερμική κίνηση τείνει να καταστρέψει τη σιδηροηλεκτρική τάξη. Μερικοί σιδηροηλεκτρικοί κρύσταλλοι δεν έχουν σημείο Curie γιατί τήκονται προτού φύγουν από τη σιδηροηλεκτρική φάση. Ο πίνακας περιλαμβάνει επίσης τιμές της αυθόρμητης πόλωσης P_s . Οι σιδηροηλεκτρικοί κρύσταλλοι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές ομάδες, τάξης-αταξίας ή μετατόπισης, σύμφωνα με το αν η μετάβαση συνδέεται με την τάξη καθενός ιόντος ή συνδέεται με τη μετατόπιση ολόκληρου του υποπλέγματος των ιόντων ενός είδους ως προς το άλλο υποπλέγμα.

		T_c οέ K	P_1 οέ esu cm ⁻² , οέ T K	
KDP τύπος	KH ₂ PO ₄	123	16,000	[96]
	KD ₂ PO ₄	213	13,500	—
	RbH ₂ PO ₄	147	16,800	[90]
	RbH ₂ AsO ₄	111	—	—
	KH ₂ AsO ₄	96	15,000	[80]
	GeTe	670	—	—
TGS τύπος	Tri-glycine sulfate	322	8,400	[293]
	Tri-glycine selenate	295	9,600	[273]
Περοβοκίτες	BaTiO ₃	393	78,000	[296]
	SrTiO ₃	~0	(9,000)	[4]
	KNbO ₃	712	90,000	[523]
	PbTiO ₃	763	>150,000	[300]
	LiTaO ₃	890	70,000	[720]
	LiNbO ₃	1470	900,000	—

Πίνακας 3.2 Συλλογή δεδομένων σε σιδηροηλεκτρικά υλικά.

Η άλλη ομάδα τάξης-αταξίας των σιδηροηλεκτρικών περιλαμβάνει κρυστάλλους με δεσμούς υδρογόνου στους οποίους η κίνηση των πρωτονίων συνδέεται με τις σιδηροηλεκτρικές ιδιότητες όπως το δισόξινο φωσφορικό κάλλιο (KH₂PO₄) και τα ισόμορφα άλατα. Η συμπεριφορά των κρυστάλλων στους οποίους το υδρογόνο έχει αντικατασταθεί από το δευτέριο είναι ενδιαφέρουσα:

	KH₂PO₄	KD₂PO₄	KH₂AsO₄	KD₂AsO₄
Θερμοκρασία Curie	123K	213K	96K	162K



Σχήμα 3.8 Πόλωση που έχει προβληθεί σε μία ακμή κύβου του BaTiO₃, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η αντικατάσταση των πρωτονίων με δευτέρια σχεδόν διπλασιάζει την T_c , αν και η κλασματική αλλαγή στο μοριακό βάρος της ένωσης είναι μικρότερο από 2%. Αυτή η καταπληκτικά μεγάλη ισοτοπική μετατόπιση θεωρείται ότι είναι κβαντικό φαινόμενο που περιέχει την εξάρτηση του μήκους κύματος de Broglie από τη μάζα. Δεδομένα της περίθλασης νετρονίων δείχνουν ότι πάνω από τη θερμοκρασία Curie η κατανομή των

πρωτονίων γύρω από τον δεσμό του υδρογόνου είναι συμμετρικά επιμήκης. Κάτω από τη θερμοκρασία Curie η κατανομή είναι πιο συγκεκριμένη και ασύμμετρη σε σχέση με τα γειτονικά ιόντα, έτσι το ένα άκρο του δεσμού του υδρογόνου αντικαθίσταται με πρωτόνιο ως προς το άλλο άκρο.

Η μετατοπίσιμη τάξη των σιδηροηλεκτρικών περιλαμβάνει δομές ιοντικών κρυστάλλων σχεδόν όμοιες με του περοβσκίτη και του ιλμενίτη. Ο πιο απλός σιδηροηλεκτρικός κρύσταλλος είναι το GeTe με δομή χλωριούχου νατρίου. Θα αναφερθούμε αρχικά σε κρυστάλλους με δομή περοβσκίτη.

Θεωρούμε την τάξη μεγέθους των σιδηροηλεκτρικών φαινομένων το τιτανικό βάριο (BaTiO_3). Η παρατηρούμενη πόλωση κορεσμού P_s σε θερμοκρασία δωματίου $0,3 \text{ C m}^{-2}$. Ο όγκος μιας κυψελίδας είναι:

$$p \cong (3 \times 10^{-1} \text{ C m}^{-2})(64 \times 10^{-30} \text{ m}^3) \cong 2 \times 10^{-29} \text{ C m} \quad (3-12)$$

Αν τα θετικά ιόντα Ba^{2+} και Ti^{4+} είχαν μετατοπιστεί κατά $\delta=0,1 \text{ \AA}$ σε σχέση με τα αρνητικά ιόντα O^{2-} , η διπολική ροπή της κυψελίδας θα ήταν $6ed=1,1 \cdot 10^{-29} \text{ C m}$. Σε πολλά σιδηροηλεκτρικά υλικά δεν πολώνεται ολόκληρος ο όγκος του κρυστάλλου προς την ίδια διεύθυνση αλλά χωρίζεται σε περιοχές πόλωσης με διαφορετικές διεύθυνσης πόλωσης, τα όρια των περιοχών αυτών αλλάζουν δύσκολα, κυρίως με μεταβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο.

Πυροηλεκτρισμός. Σε μερικούς κρυστάλλους η σιδηροηλεκτρική διπολική ροπή δεν αλλάζει με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου ακόμη και με τη μέγιστη ένταση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να συμβεί ηλεκτρική εκκένωση. Σε αυτούς τους κρυστάλλους παρατηρούμε συνήθως μία αλλαγή στην αυθόρμητη διπολική ροπή σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι κρύσταλλοι αυτοί ονομάζονται πυροηλεκτρικοί.

3.3.3.4 Χωρητικά Φαινόμενα

Ένα ηλεκτρικό στοιχείο που εμφανίζει την ιδιότητα της χωρητικότητας είναι ο πυκνωτής ο οποίος αποτελείται από δύο αγωγούς μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα διηλεκτρικό υλικό. Η χωρητικότητα μετρείται σε farad και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon_o \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (3-13)$$

όπου A το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή, ϵ_o , απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου, ϵ_r η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού και d η απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

Η λειτουργία των χωρητικών αισθητήρων βασίζεται στη μεταβολή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή. Υπάρχουν τρεις τρόποι που μπορούν να προκαλέσουν μια τέτοια μεταβολή: η μεταβολή της επιφάνειας επικάλυψης A , της ηλεκτρικής διαπερατότητας του διηλεκτρικού ϵ_r , ή της απόστασης d μεταξύ των οπλισμών.

Η πιο απλή διάταξη χωρητικού αισθητήρα είναι ο αισθητήρας μετατόπισης όπου ο ένας οπλισμός του πυκνωτή παραμένει σταθερός σε ένα σημείο αναφοράς καθώς ο άλλος είναι προσαρτημένος σε κινούμενο στοιχείο, του οποίου η μετατόπιση μετράται. Ανάλογα με τον τρόπο προσάρτησης του κινούμενου οπλισμού στο στοιχείο που μετακινείται αλλάζει είτε η επιφάνεια επικάλυψης του οπλισμού αυτού είτε η απόστασή του από τον σταθερό οπλισμό, προκαλώντας ανάλογη μεταβολή στη χωρητικότητα.

Παράδειγμα χωρητικών αισθητήρων που βασίζονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής διαπερατότητας του διηλεκτρικού είναι οι αισθητήρες ανίχνευσης αερίων. Η παρουσία του

αερίου ανάμεσα στους οπλισμούς της διάταξης προκαλεί μεταβολή της χωρητικότητας. Μια άλλη εφαρμογή αυτής της κατηγορίας είναι οι αισθητήρες υγρασίας.

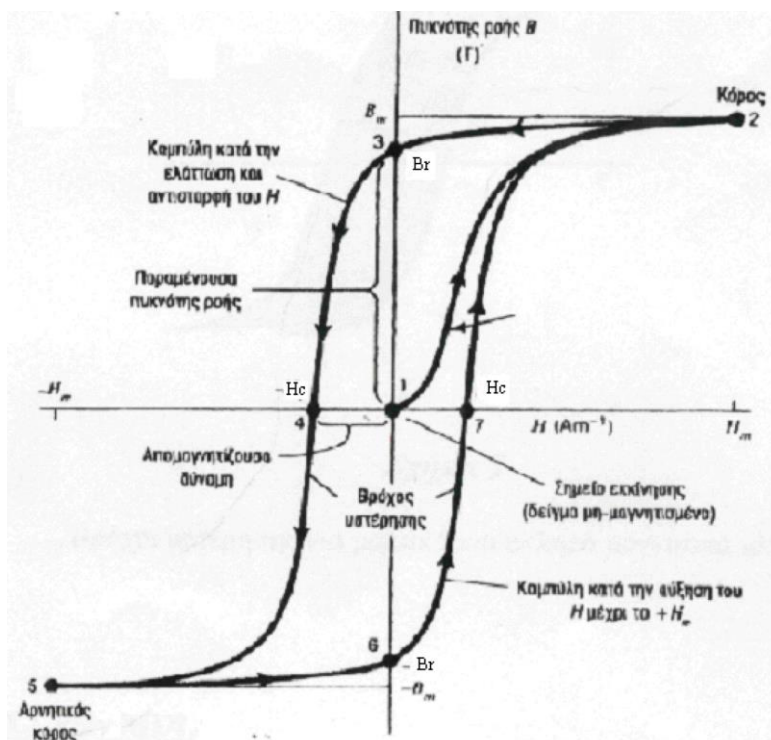
Οι χωρητικοί αισθητήρες παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα αλλά επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και έχουν μεγάλο κόστος, λόγω των απαιτούμενων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ανάγνωσης και επεξεργασίας σήματος. Παραδείγματα εφαρμογών τους είναι η ανίχνευση της μορφολογίας επιφανειών, η καταγραφή ρωγμών σε ένα υλικό κ.ά.

3.3.4 Μαγνητικά Φαινόμενα

Οι κύριες εφαρμογές των μαγνητικών φαινομένων και υλικών στον τομέα των αισθητήρων έχουν σχέση με την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου αλλά και την αλλαγή μαγνητικού κυκλώματος, που επιτρέπουν τη μέτρηση κάποιου φυσικού μεγέθους, όπως μετατόπιση, μηχανική τάση, ροή, πεδίο κ.λπ.

Η δυναμική των μαγνητικών περιοχών (magnetic domains) είναι ο κύριος μηχανισμός που ευθύνεται για τα μαγνητικά φαινόμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αισθητήρων. Πολλά φερρομαγνητικά υλικά δεν παρουσιάζουν μαγνήτιση παρά μόνο αν τους εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά φαινόμενα που αναλύονται περιγράφουν τον τρόπο επίδρασης του εξωτερικού πεδίου επί των μαγνητικών περιοχών του υλικού. Κάθε δυνατή χρήση της απόκρισης αυτών των φαινομένων μπορεί να οδηγήσει και σε ένα καινούριο αισθητήριο στοιχείο.

Η επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, H , στη μαγνητική επαγωγή, B , ενός μη μαγνητισμένου φερρομαγνητικού υλικού χαρακτηρίζεται από την καθυστέρηση της μαγνητικής επαγωγής ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης). Το φαινόμενο περιγράφεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 3.9**, από τον κλειστό δρόμο (βρόχο) 2-3-4-5-6-7-2, ο οποίος ονομάζεται κύριος βρόχος υστέρησης. Ο κύριος βρόχος υστέρησης είναι ο μέγιστος βρόχος που είναι δυνατόν να προκύψει, όσο μεγάλες κι αν είναι οι ακραίες τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου.



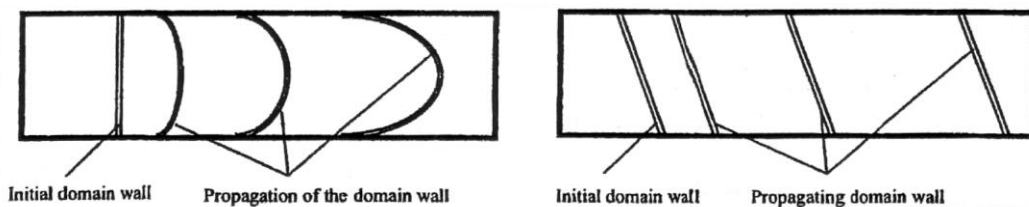
Σχήμα 3.9 Κύριος βρόχος υστέρησης (Br: παραμένουσα ή μόνιμη μαγνήτιση, Hc: απομαγνητική δύναμη, 2: κόρος, 5: αρνητικός κόρος).

Η μαγνητική δομή ενός τέτοιου υλικού απλουστευτικά μπορεί να προσομοιωθεί ως μια τοπογραφία περιοχών συγκεκριμένης μαγνητικής ροπής (μαγνητικές περιοχές), οι οριακές – μεταβατικές περιοχές των οποίων ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα. Έτσι, διακρίνονται δύο περιπτώσεις δυναμικής συμπεριφοράς των εν λόγω περιοχών (domain dynamics): η δυναμική των μαγνητικών τοιχωμάτων (domain wall dynamics) και η δυναμική της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών (domain rotation dynamics). Επίσης υπάρχουν μικροσκοπικά και μακροσκοπικά φαινόμενα που εξαρτώνται από τις παραπάνω διαδικασίες.

3.3.4.1 Δυναμική των Μαγνητικών Τοιχωμάτων

Το φαινόμενο σχετίζεται με την πυρήνωση και τη μετάδοση των τοιχωμάτων μέσα στο μαγνητικό υλικό. Η μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων αποτελεί το πρώτο στάδιο μαγνήτισης του υλικού γεγονός που εξηγείται ως εξής: τα μαγνητικά τοιχώματα είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερα από τις μαγνητικές περιοχές. Έτσι ενεργειακά η ενεργοποίηση των διπόλων των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι σαφώς συμφέρουσα από την ενεργοποίηση του μεγάλου αριθμού διπόλων που περιλαμβάνουν οι μαγνητικές περιοχές. Η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων συνεπάγεται την αύξηση του μεγέθους των μαγνητικών περιοχών η ροπή των οποίων είναι περίπου ίδιας φοράς με τη φορά του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και συνεπώς τη μείωση εκείνων που η φορά των ροπών τους είναι αντίθετη με τη φορά του εξωτερικού πεδίου.

Υπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων: η μετάδοση με παραμόρφωση και διόγκωση (bowing) και η παράλληλη κίνησή τους. Ο τρόπος μετάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων εξαρτάται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα τοιχώματα. Τα τοιχώματα χαμηλής ενέργειας μεταδίδονται με τη διαδικασία διόγκωσης, σε αντίθεση με τοιχώματα υψηλής ενέργειας που μεταδίδονται με παράλληλη κίνηση (**Σχήμα 3.10**).



Σχήμα 3.10 Μετάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων με διόγκωση και με παράλληλη κίνηση.

Οι λόγοι συσσώρευσης υψηλής ενέργειας στα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών είναι, κυρίως, τα φαινόμενα αγκύρωσης (pinning effects) των μαγνητικών διπόλων και η παρουσία ατελειών στη δομή του υλικού. Είναι γεγονός ότι ατέλειες υπάρχουν τόσο στα μαλακά όσο και στα σκληρά μαγνητικά υλικά. Άρα η μετάδοση τοιχωμάτων με διόγκωση είναι πιο πιθανό να συμβεί σε υλικά με μικρό φαινόμενο αγκύρωσης (low pinning materials)- δηλαδή σε μαλακά μαγνητικά υλικά- ενώ η παράλληλη κίνηση είναι πιο πιθανή σε σκληρά μαγνητικά υλικά.

Ένα χαρακτηριστικό της μετάδοσης των τοιχωμάτων που επηρεάζεται από το φαινόμενο αγκύρωσης και την παρουσία ατελειών στο υλικό, είναι η αντιστρεψιμότητα ή μη της μετάδοσης. Κατά την αντιστρεπτή μεταβολή της μαγνήτισης -μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου- η μαγνήτιση του υλικού επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση. Αντιθέτως κατά τη μη αντιστρεπτή μεταβολή της μαγνήτισης μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου υπάρχει μια παραμένουσα μαγνήτιση. Συνήθως τα στάδια μαγνήτισης ενός υλικού περιλαμβάνουν και την αντιστρεπτή και τη μη αντιστρεπτή μεταβολή της μαγνήτισης. Η αντιστρεψιμότητα ή μη αφορά τόσο τις μαγνητικές περιοχές όσο και τα μαγνητικά τοιχώματα.

Η επίδραση των ατελειών του υλικού στην αντιστρεψιμότητα ή μη της μετάδοσης των τοιχωμάτων έχει ως εξής: όταν το υλικό έχει ατέλειες (εγκλείσματα κλπ.) για να πραγματοποιηθεί κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος και να ξεπεραστούν οι ατέλειες το τοίχωμα χρειάζεται ενέργεια, την οποία λαμβάνει από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου, το μαγνητικό τοίχωμα στερείται εκείνου του ποσού ενέργειας που είναι απαραίτητο για να ξεπεράσει και πάλι το εμπόδιο και να επιστρέψει στην αρχική του θέση. Στην περίπτωση αυτή η μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι μη αντιστρεπτή, ενώ όταν το υλικό στερείται ατελειών η μετάδοση των τοιχωμάτων μπορεί να είναι αντιστρεπτή.

Στην περίπτωση των αισθητήρων η αντιστρεψιμότητα της μετάδοσης καθορίζει την παρουσία, ή μη μαγνητικής υστέρησης στο αισθητήριο στοιχείο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια μαγνητική συσκευή θα πρέπει να έχει μηδενική υστέρηση και άλλες που θα πρέπει να έχει μεγάλη υστέρηση. Λόγου χάρη στους αισθητήρες που μετρούν φυσικά μεγέθη, η απουσία υστέρησης βελτιώνει την αβεβαιότητα (uncertainty) της απόκρισης του αισθητήρα ενώ στα μέσα μαγνητικής εγγραφής (recording media) απαιτείται μεγάλη υστέρηση.

Έτσι ανάλογα με το αν είναι επιθυμητή ή όχι η παρουσία υστέρησης, προσαρμόζεται και το μαγνητικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Δηλαδή αν ο αισθητήρας βασίζεται στη μετάδοση τοιχωμάτων με το μικρότερο δυνατό εύρος υστέρησης, το υλικό θα πρέπει να περιέχει όσο το δυνατό λιγότερες ατέλειες και να είναι όσο το δυνατό πιο μαλακό μαγνητικά. Αυτό ελέγχεται με τη σύνθεση του υλικού στοχεύοντας σε απομαγνητίζοντα πεδία της τάξης των 10mOe καθώς και με ανόπτηση, προκειμένου να ελαττωθούν στο ελάχιστο οι εσωτερικές τάσεις (residual stresses), που οφείλονται στις προαναφερόμενες ατέλειες. Οι τυπικές θερμοκρασιακές συνθήκες ανόπτησης είναι: αύξηση θερμοκρασίας 5-20°C/min, σταθερή κατάσταση 300-750°C για 10-60min και τελικά φυσική ψύξη σε ατμόσφαιρα Ar για περίπου 12-24h. Οι τυπικές συνθήκες πεδίου είναι 800-8000A/m κατά τη διεύθυνση του εύκολου

άξονα μαγνήτισης (easy axis). Τέλος άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η ανόπτηση με εφαρμογή μηχανικής τάσης και ρεύματος (stress-current annealing), με τυπικές τιμές τάσης εφελκυσμού και ρεύματος 100-500MPa και 100-300mA, αντίστοιχα.

Αντιθέτως στους αισθητήρες ασφάλειας τα φαινόμενα αγκύρωσης των μαγνητικών διπόλων και η ελεγχόμενη εισαγωγή ατελειών στον πυρήνα του αισθητήρα μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη βελτίωση της ευστάθειας του αισθητήρα. Στην ορολογία των αισθητήρων η ευστάθεια αποτελεί το μέτρο της μεταβολής της εξόδου της συσκευής όταν η είσοδος είναι σταθερή, αλλά άλλες εμπλεκόμενοι παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, αλλάζουν.

Η μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων σηματοδοτεί την έναρξη της μαγνήτισης του υλικού. Όταν η μετάδοση των τοιχωμάτων διαμέσω του μαγνητικού υλικού έχει σχεδόν ολοκληρωθεί ή απαιτείται αρκετά μεγαλύτερη ενέργεια για την κίνησή τους, η διαδικασία μαγνήτισης συνεχίζεται με την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών.

3.3.4.2 Δυναμική Περιστροφής των Μαγνητικών Περιοχών

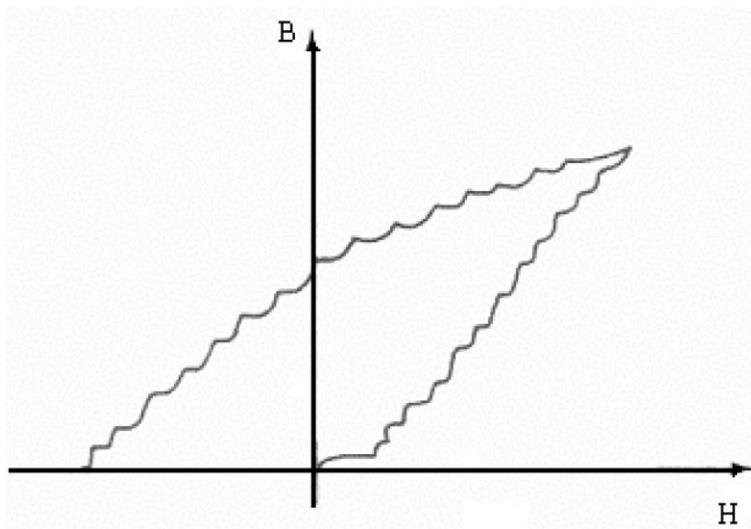
Κάθε μαγνητική περιοχή συνίσταται από άτομα που έχουν μαγνητικές ροπές ίδιας κατεύθυνσης. Η διεύθυνση και φορά των ροπών αυτών υποδεικνύουν τη διεύθυνση και φορά της μαγνητικής ροπής της συγκεκριμένης περιοχής. Οι μαγνητικές περιοχές συνήθως έχουν επιφάνειες της τάξης των τετραγωνικών μικρομέτρων έως τετραγωνικών χιλιοστομέτρων. Οι φορές των ροπών των μαγνητικών περιοχών ενός μαγνητικού υλικού διαμορφώνονται έτσι ώστε, στην απουσία εξωτερικού πεδίου, να εξασφαλίζεται η μηδενική μαγνήτιση του εν λόγω υλικού. Για παράδειγμα σε μη μαγνητισμένη επιφάνεια σιδήρου (λεπτό υμένιο) οι περισσότερες μαγνητικές περιοχές έχουν διεύθυνση παράλληλη με τη διεύθυνση του εύκολου άξονα μαγνήτισης αλλά η φορά των μισών από αυτές είναι αντίθετη με εκείνη των άλλων μισών. Φυσικά οι υπόλοιπες περιοχές έχουν κάθετη φορά ως προς τις προαναφερόμενες για λόγους χαμηλής μαγνητοστατικής ενέργειας. Έτσι το μαγνητικό πεδίο στο μη μαγνητισμένο υμένιο είναι μηδέν.

Η παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μεγαλύτερης έντασης από αυτή που απαιτείται για την κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων, οδηγεί σε μη αντιστρεπτή περιστροφή των μαγνητικών περιοχών. Η μη αντιστρεπτή περιστροφή συμβαίνει όταν με παρουσία εξωτερικού πεδίου Η οι μαγνητικές περιοχές που αρχικά είναι προσανατολισμένες προς ένα εύκολο άξονα μαγνήτισης, Α, επαναπροσανατολίζονται προς ένα άλλο εύκολο άξονα μαγνήτισης, Β, ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στον άξονα του εξωτερικού πεδίου. Ο προσανατολισμός αυτός των μαγνητικών περιοχών στην πραγματικότητα είναι μια απότομη μετάβαση στον εύκολο άξονα Β (Barkhausen jumps). Έτσι η καμπύλη μαγνήτισης στην πραγματικότητα έχει την κλιμακωτή μορφή του **Σχήματος 3.11**. Η επιστροφή των διπόλων στον άξονα Α μπορεί να συμβεί μόνο με την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίστροφης πολικότητας και μεγαλύτερης απόλυτης τιμής. Κατά συνέπεια η διαδικασία αυτή είναι μη αντιστρεπτή και περιέχει υστέρηση.

Εφόσον ο νέος άξονας Β, σε γενικές γραμμές δεν είναι ίδιος με τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου Η, τα μαγνητικά δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν προς τον άξονα του εξωτερικού πεδίου, όταν το εν λόγω πεδίο, Η, μεγαλώνει σε μέγεθος. Αν όμως, αφαιρεθεί το εξωτερικό πεδίο, Η, οι μαγνητικές περιοχές που έχουν περιστραφεί προς τον άξονα του εν λόγω πεδίου, επιστρέφουν στη διεύθυνση του άξονα Β. Έτσι αυτή η περιστροφή των διπόλων που οδηγεί σε μεγαλύτερη μαγνήτιση του υλικού, στον άξονα του πεδίου που εφαρμόζεται, είναι αντιστρεπτή δηλαδή ανυστερητική.

Από τα προηγούμενα φαίνεται ότι η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, που προκαλεί μαγνήτιση του υλικού, προκαλεί σχεδόν μηδενικές αλλαγές στη γεωμετρία του μαγνητικού υλικού. Αντίθετα, η μη αντιστρεπτή περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (Barkhausen jumps) προκαλεί αλλαγές στη γεωμετρία του υλικού κατά τη διάρκεια της

μαγνήτισής του, λόγω της μη σφαιρικής αλλά ελλειψοειδούς μορφής των μαγνητικών διπόλων που περιστρέφονται.



Σχήμα 3.11 Φαινόμενο Barkhausen.

Αυτή η αλλαγή της γεωμετρίας ονομάζεται μαγνητοσυστολή (magnetostriction). Η ίδια αλλαγή γεωμετρίας παρατηρείται και στην προαναφερθείσα ανυστερητική περιστροφή των μαγνητικών διπόλων προς τον άξονα του επιβαλλόμενου πεδίου, H . Μόνο που αυτή η αλλαγή γεωμετρίας και η συνεπακόλουθη μαγνητοσυστολή είναι ανυστερητική.

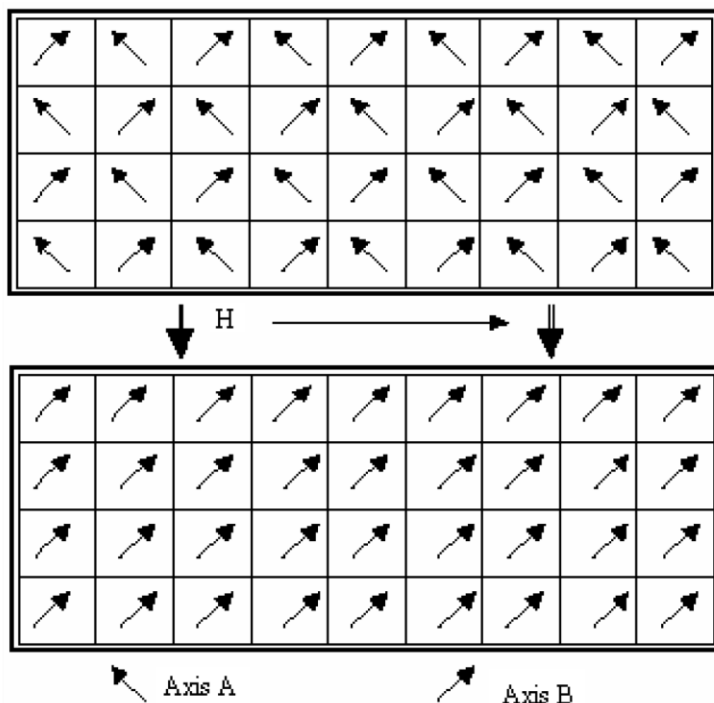
Είναι λοιπόν φανερό ότι όσο περισσότερη κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων συμβαίνει, κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, τόσο λιγότερο μαγνητοσυστολικό είναι το υλικό που μαγνητίζεται. Επίσης, όσο περισσότερη είναι η ανυστερητική περιστροφή των μαγνητικών διπόλων, τόσο πιο ανυστερητικός είναι ο μαγνητοσυστολικός βρόχος του υλικού.

Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων αφού τόσο η υστέρηση όσο και ο μαγνητικός θόρυβος, εξαιτίας του φαινομένου Barkhausen, επηρεάζουν την αβεβαιότητα κάθε μαγνητικής συσκευής.

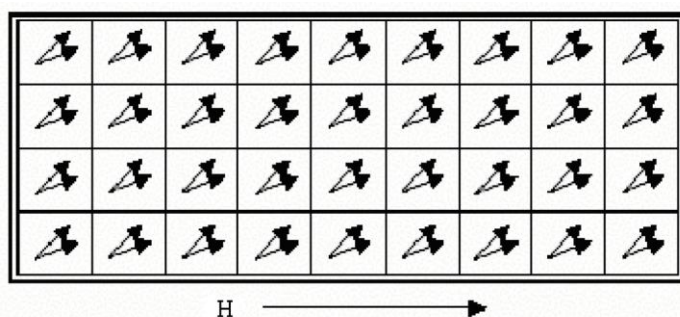
Όταν λοιπόν χρησιμοποιείται το φαινόμενο της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών για την ανάπτυξη αισθητήρων το μαγνητικό υλικό θα πρέπει να προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το εύρος του εξωτερικού πεδίου που ευθύνεται για την κατάσταση της μη αντιστρεπτής περιστροφής και να μεγιστοποιείται το εύρος του εξωτερικού πεδίου που ευνοεί την αντιστρεπτή περιστροφή.

Κάτι τέτοιο σημαίνει προσαρμογή των μαγνητοσυστολικών ιδιοτήτων του υλικού (προσαρμογή της καμπύλης μαγνητοσυστολής λ - H). Τα μαγνητοσυστολικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αυτού του φαινομένου, είναι της μορφής λεπτών υμενίων, ταινιών (ribbons) και συρμάτων. Στην ελαχιστοποίηση του σταδίου μη αντιστρεπτής περιστροφής βοηθά το γεγονός ότι τα μαγνητοσυστολικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμορφα και έτσι τόσο το μέτρο του πεδίου απομαγνήτισης όσο και εκείνο του πεδίου που ευθύνεται για τις μη αντιστρεπτές περιστροφές των μαγνητικών περιοχών, είναι μικρά. Είναι πολύ πιθανό να υπάρξει περαιτέρω μείωση του σταδίου μη αντιστρεπτής περιστροφής των μαγνητικών περιοχών με χρήση πρόσφατα αναπτυχθέντων ναοκρυσταλλικών υλικών.

Ομοίως με τη μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων, τεχνικές ανόπτησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη βελτίωση της ανυστερητικής περιστροφής των μαγνητικών περιοχών και κυρίως για την εξάλειψη τοπικών φαινομένων αγκύρωσης.



Σχήμα 3.12 Μη αντιστρεπτή περιστροφή μαγνητικών περιοχών.



Σχήμα 3.13 Αντιστρεπτή περιστροφή μαγνητικών περιοχών.

3.3.4.3 Μαγνητο-εμπέδηση

Κατά το φαινόμενο αυτό, η μαγνητική εμπέδηση (magneto-impedance) ενός μαγνητικού υλικού μεταβάλλεται, ανάλογα με το εφαρμοζόμενο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε μερικά σύρματα με συντελεστή μαγνητοσυστολής 0.1-1ppm (zero magnetostriction materials) έχει παρατηρηθεί αλλαγή της μαγνητο-εμπέδησης περισσότερο από 100%, σε συνάρτηση με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο εναλλασσόμενο πεδίο.

Όταν χρησιμοποιείται ένα μαλακό μαγνητικό υλικό με εφαρμογή ενός αρκετά μικρού πεδίου η διαπερατότητα είναι δυνατό να αλλάζει τάξεις μεγέθους, με άμεση συνέπεια την εμφάνιση ισχυρών διακυμάνσεων στο βάθος διείσδυσης, δ , των επιφανειακών δινορευμάτων άρα και στην εμπέδηση του δείγματος, δεδομένου ότι:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (3-14)$$

όπου, f συχνότητα ρεύματος διέγερσης, ρ η ειδική αντίσταση του υλικού, μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, δ το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων. Υπάρχει στενή εξάρτηση του φαινομένου από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος καθώς και από την παρουσία μαγνητικής ανισοτροπίας στο υλικό.

Η διαπερατότητα κάθε υλικού επηρεάζεται τόσο από την κίνηση των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών όσο και από την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών. Το κατά πόσο επηρεάζει η μία ή η άλλη κίνηση εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος. Δηλαδή, σε σχετικά χαμηλές συχνότητες ($f < 500\text{kHz}$), και οι δύο κινήσεις είναι υπεύθυνες για τη διαδικασία της μαγνήτισης ενώ σε υψηλότερες συχνότητες όπου το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) είναι ισχυρότερο, οι κινήσεις των μαγνητικών τοιχωμάτων εξουδετερώνονται από τα δινορεύματα και έτσι στη διαδικασία μαγνήτισης κυριαρχεί η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών.

Έστω, ένα δείγμα κατά τη διαμήκη διεύθυνση του οποίου αυξάνεται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Στην περίπτωση που το δείγμα έχει ένα εύκολο διαμήκη άξονα μαγνήτισης, οι περιστροφικές διαδικασίες κυριαρχούν κατά τη μαγνήτιση του δείγματος και η καμπύλη της εμπέδησης παρουσιάζεται ως μονότονα φθίνουσα. Η αύξηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου συνεπάγεται περιστροφή της μαγνήτισης και οδηγεί σε μείωση της εμπέδησης η οποία φτάνει σε μια πολύ χαμηλή τιμή.

3.3.4.4 Μαγνητο-αντίσταση

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης (magneto-resistance), παρατηρείται κυρίως σε λεπτά υμένια. Το φαινόμενο περιγράφει τη μεταβολή της ηλεκτρικής (ωμικής – dc) αντίστασης ενός μαγνητικού υμενίου περίπου 2-3%, εξαιτίας του εφαρμοζόμενου συνεχούς μαγνητικού πεδίου. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στη διαδικασία περιστροφής των μαγνητικών περιοχών και ορισμένες φορές στην πυρήνωση των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών. Ουσιαστικά είναι η σκέδαση των κινούμενων ηλεκτρονίων εξαιτίας της δύναμης Lorentz που προκαλείται όταν το διάνυσμα του ρεύματος -που προέρχεται από τις κινήσεις των ηλεκτρονίων- συναντήσει μαγνητικό δίπολο με διάνυσμα ροπής κάθετο στο διάνυσμα του ρεύματος.

Ιδιαίτερης αναφοράς αξίζει το φαινόμενο της «γιγάντιας» μαγνητοαντίστασης (“giant” magnetoresistive effect) το οποίο εμφανίζεται σε μερικά μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια (multi-layers), και προκαλεί αλλαγή αντίστασης 50-80%, σε θερμοκρασία δωματίου. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην κάθετη ανισοτροπία των μαγνητικών στρωμάτων των πολυστρωματικών υμενίων. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται ως αρχή λειτουργίας αισθητήρων πεδίου και καταγραφικών μέσων.

3.3.4.5 Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των φερρομαγνητικών υλικών είναι η μικρή μεταβολή των διαστάσεών τους (επιμήκυνση ή συστολή) που συμβαίνει κατά τη μαγνήτισή τους.

Ευρέως διαδεδομένη είναι η χρήση άμορφων φερρομαγνητικών συρμάτων και ταινιών, σε εφαρμογές αισθητήρων τύπου μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης (magnetostrictivedelay lines-MDL). Από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά των διατάξεων αυτής της τεχνικής είναι η καλή ευαισθησία των σημάτων τους σε εφαρμογές όπου άλλες τεχνικές υστερούν στην ευαισθησία και στην απόκρισή τους. Με την τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες ανίχνευσης δύναμης, ροπής, μετατόπισης και μαγνητικού πεδίου.

Οι παράμετροι που μπορούν να τροποποιήσουν το εύρος της παλμικής τάσης εξόδου μιας τέτοιας διάταξης είναι οι εξής: η μεταβολή του παλμικού ή του μαγνητικού πεδίου πόλωσης, κατά μήκος του MDL, και η αλλαγή των μαγνητοσυστολικών ιδιοτήτων του υλικού

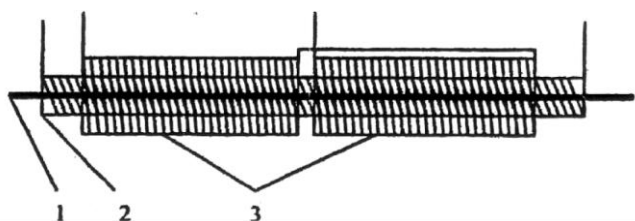
της διάταξης (π.χ. εξαιτίας της εφαρμογής δύναμης κατά μήκος του MDL). Τροποποιώντας μία και μόνο παράμετρο κάθε φορά, προκύπτει και ένας νέος αισθητήρας.

3.3.4.6 Επαγωγικά Φαινόμενα

Τα κλασικά επαγωγικά φαινόμενα που βασίζονται στην αρχή του γραμμικού, μεταβλητού, διαφορικού μετασχηματιστή (linear variable differential transformer -LVDT) χρησιμοποιούνται ευρέως για την ακριβή ανίχνευση πεδίου αλλά και μετρήσεις μετατόπισης και εφελκυσμού.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται σε ένα διαφορικό μετασχηματιστή με μεταβλητή σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος πηνίου και των δευτερευόντων πηνίων του. Η προαναφερθείσα μαγνητική σύζευξη εξαρτάται από το είδος του μαγνητικού υλικού και από τη θέση του κινούμενου μαγνητικού πυρήνα σε σχέση με τα δευτερεύοντα πηνία.

Η διάταξη αποτελείται από ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία, τα οποία βρίσκονται σε σύζευξη μεταξύ τους. Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα διαπερνά το πρωτεύον πηνίο παράγεται εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και, λόγω του νόμου της Επαγωγής, στα δευτερεύοντα πηνία επάγεται ΗΕΔ η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά το πρωτεύον πηνίο και του πηλίκου των περιελίξεων πρωτεύοντος-δευτερευόντων πηνίων.



Σχήμα 3.14 Διάταξη LVDT (1: μαλακό μαγνητικό υλικό, 2: πηνίο διέγερσης, 3: πηνία λήψης).

Τα πηνία κατασκευάζονται γύρω από έναν σωλήνα (το πρωτεύον στο κέντρο και εκατέρωθεν τα δύο δευτερεύοντα), ενώ ένας πυρήνας (π.χ. μαλακού σιδήρου) τοποθετείται στο κέντρο με τέτοιον τρόπο ώστε να κινείται ελεύθερα στο εσωτερικό των πηνίων (**Σχήμα 3.14**). Όταν ο πυρήνας βρίσκεται στο εσωτερικό του πρωτεύοντος πηνίου και διέλθει από αυτό εναλλασσόμενο ρεύμα, επάγεται αλλαγή της μαγνήτισης στο εσωτερικό του πυρήνα. Στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων αναπτύσσεται η ίδια ΗΕΔ (λόγω της ίδιας σύζευξης του πρωτεύοντος με κάθε δευτερεύον πηνίο) και τα παραγόμενα σήματα θα αλληλοαναιρεθούν, με αποτέλεσμα η συνολική τάση εξόδου να είναι μηδέν. Όταν όμως υπάρξει μετατόπιση του πυρήνα προς τη μια κατεύθυνση, η σύζευξη του πρωτεύοντος με το ένα δευτερεύον θα αυξηθεί ενώ με το άλλο θα μειωθεί και η συνολική τάση εξόδου στα δευτερεύοντα πηνία θα αυξηθεί. Τελικά όταν η σύζευξη του πρωτεύοντος με το ένα δευτερεύον γίνεται μέγιστη, κάθε επιπλέον μετατόπιση δεν οδηγεί σε αύξηση της τάσης στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων.

Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας στον χώρο των LVDT, είναι η χρήση άμορφων συρμάτων με επικάλυψη γυαλιού, ως ενεργού πυρήνα. Η χρήση τους δίνει τη δυνατότητα να κατασκευάζονται στοιχεία αισθητήρα πολύ μικρών διαστάσεων, διασφαλίζοντας υψηλή αντοχή στη διάβρωση.

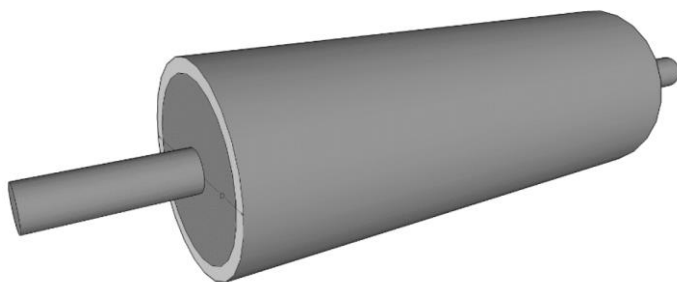
Ενθαρρυντικά ήταν τα αποτελέσματα δοκιμών σε άμορφα σύρματα FeSiB και CoFeSiB με επικάλυψη γυαλιού. Τα άμορφα σύρματα FeSiB με επικάλυψη γυαλιού δίνουν τη δυνατότητα λήψης μεγάλου σήματος εξόδου από τον LVDT με μικρό πεδίο διέγερσης και μικρό αριθμό περιελίξεων στα δευτερεύοντα πηνία.

Η απόκριση του αισθητήρα σε σχέση με τη μετατόπιση του κινούμενου πυρήνα, κατά μήκος του LVDT είναι γραμμική για μετατοπίσεις της τάξης των 10mm, με ακρίβεια 1μm. Με χρήση άμορφων συρμάτων που έχουν υποστεί ανόπτηση ρεύματος, είναι δυνατή η αύξηση της τάσης εξόδου μέχρι και δύο φορές.

Οι LVDT με ενεργούς πυρήνες από άμορφα σύρματα με επικάλυψη γυαλιού βρίσκουν σημαντική εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αυστηρά μικρή αδράνεια μάζας του ενεργού πυρήνα.

Παράδειγμα 3.2

Να υπολογιστεί η επί τοις εκατό απόδοση του αισθητήρα γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) του σχήματος. Δίνονται: διάμετρος $D = 100 \mu m$, συχνότητα $f = 2 MHz$, ειδική αντίσταση $\rho = 150 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ και μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 2 \cdot 10^{-2} H / m$.



Σχήμα 3.15 Ο αισθητήρας GMI.

Απάντηση

Αρχικά, έχουμε:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση, l το μήκος και S το εμβαδόν της διατομής του αισθητήρα. Η τελική εμπέδηση θα ισούται με:

$$R' = Z = \rho \frac{l}{S'} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2 - \frac{\pi}{4} \cdot (D - 2\delta)^2} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (D - 2\delta)^2]} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R' = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot [D - (D - 2\delta)] \cdot [D + (D - 2\delta)]} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot (2\delta) \cdot (2D - 2\delta)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R' = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot (4 \cdot \delta \cdot D - 4 \cdot \delta^2)} = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot 4 \cdot \delta \cdot (D - \delta)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R' = \rho \frac{l}{\pi \cdot \delta \cdot (D - \delta)} \stackrel{D \gg \delta}{\Rightarrow} R' \simeq \rho \frac{l}{\pi \cdot \delta \cdot D}$$

όπου δ είναι το επιδερμικό βάθος.

Όμως, το επιδερμικό βάθος ισούται με:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{2}{\frac{1}{\rho} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ω η γωνιακή συχνότητα, f η συχνότητα και μ η μαγνητική διαπερατότητα του αισθητήρα.

Οπότε:

$$R' = \rho \frac{l}{\pi \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \cdot D} = \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}} = \frac{l}{D} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot f \cdot \mu}{\pi}}$$

Συνεπώς:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{R' - R}{R} = \frac{R'}{R} - 1 = \frac{\frac{l}{D} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot f \cdot \mu}{\pi}}}{\rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}} - 1 = \frac{\sqrt{\frac{\rho \cdot f \cdot \mu}{\pi}}}{\frac{\rho}{\frac{\pi}{4} D}} - 1 = \frac{\sqrt{\frac{\rho \cdot f \cdot \mu}{\pi}}}{\frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot D}} - 1 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\sqrt{\rho \cdot f \cdot \mu \cdot \pi \cdot D}}{\sqrt{\pi \cdot 4 \cdot \rho}} - 1 = \frac{D}{4} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu \cdot \pi}{\rho}} - 1 \end{aligned}$$

Άρα, χρησιμοποιώντας τις τιμές που δίδονται στην εκφώνηση, έχουμε:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot \pi}{150 \cdot 10^{-7}}} - 1 = 1,29$$

Οπότε, η απόδοση επί τοις εκατό είναι:

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot 100\% = 1,29 \cdot 100\% = 129\%$$

3.3.5 Υπεραγωγιμότητα Φαινόμενα

Με τον όρο υπεραγωγιμότητα, εννοούμε την ξαφνική και απόλυτη απώλεια αντίστασης σε μερικά υλικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Πρόκειται για κβαντικό φαινόμενο, για την εμφάνιση του οποίου υπάρχουν δύο μακροσκοπικές ιδιότητες: η απόλυτη εξαφάνιση της αντίστασης κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία και η μη είσοδος των μαγνητικών γραμμών στον υπεραγωγό (φαινόμενο Meissner) κάτω από αυτή την κρίσιμη θερμοκρασία.

Μια βασική εφαρμογή της υπεραγωγιμότητας σε αισθητήρες είναι τα υπεραγωγιμα μαγνητόμετρα. Σε μια επαφή υπεραγωγού-μονωτή-υπεραγωγού (SIS), λαμβάνει χώρα κβαντομηχανική οδήγηση ηλεκτρονίων (φαινόμενο Josephson). Σε μια τέτοια σύνδεση, όταν το πάχος του μονωτικού υλικού είναι αρκετά μικρό, οι κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων που αλληλεπιδρούν, όταν το κύκλωμα διαρρέεται κάθετα από μαγνητική ροή, επιτρέπουν τη μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου διαμέσω του μονωτικού υλικού για κάθε ένα κβάντο μαγνητικής ροής. Αυτή είναι, σε γενικές γραμμές, η υπεραγωγιμη διάταξη κβαντικής αλληλεπίδρασης (superconducting quantum interference device -SQUID). Τα μαγνητόμετρα SQUID, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις αλλαγής ροής τόσο χαμηλές όσο ένα κβάντο μαγνητικής ροής, που είναι $2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$.

3.4 Διατάξεις Αισθητήρων

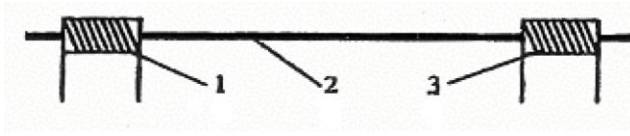
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές διατάξεις φυσικών αισθητήρων. Πρόκειται για αισθητήρες θέσης, μάζας, πεδίου και αισθητήρες που μετρούν πολλά μεγέθη ταυτόχρονα (multi-purpose sensors).

3.4.1 Αισθητήρες μετατόπισης

Η κατηγορία των αισθητήρων θέσης χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες. Πρόκειται για τους τερματικούς διακόπτες, τους απόλυτους/διαφορικούς αισθητήρες, καθώς και τους αισθητήρες ταχύτητας και τα επιταχυνσιόμετρα.

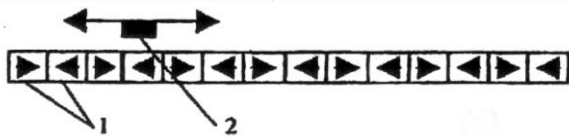
Οι τερματικοί διακόπτες είναι αισθητήρες πεδίου με ένα μηχανισμό που φέρει ελεγκτή πεδίου σαν διακόπτη on/off. Στη συντριπτική τους πλειοψηφία πρόκειται για αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητο-αντίστασης και έχουν μικρό κόστος μαζικής παραγωγής αλλά και χαμηλή ποιότητα. Ο κύριος ανταγωνιστής αυτών των συσκευών είναι οι χωρητικοί διακόπτες.

Όσον αφορά τους απόλυτους/διαφορικούς γραμμικούς και γωνιακούς αισθητήρες η λειτουργία τους είναι η ανίχνευση της απόστασης μεταξύ δύο σημείων, που συνήθως αντιστοιχούν στα σημεία διέγερσης και λήψης του κυκλώματος. Παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων είναι οι διατάξεις MDL (μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης), οι οποίες συνδυάζουν ανίχνευση χρόνου καθυστέρησης και τροποποίηση της τάσης όπως και οι διατάξεις LVDT (γραμμικός, μεταβλητός, διαφορικός μετασχηματιστής). Η ευαισθησία (sensitivity) και η αβεβαιότητα (uncertainty) των αισθητήρων αυτής της κατηγορίας μπορούν να είναι $10\mu\text{m}$ και $100\mu\text{m/m}$, αντίστοιχα, με κόστος της τάξης του 0.1kEuro/αισθητήρα. Οι συσκευές αυτές μπορούν να είναι και ασύρματες ενώ ο κύριος ανταγωνιστής τους είναι οι υπερηχητικοί αισθητήρες θέσης, οι οποίοι είναι φθηνότεροι αλλά λιγότερο ακριβείς.



Σχήμα 3.16 Διάταξη MDL σε αισθητήρα θέσης (1: κινούμενο πηνίο διέγερσης, 2: MDL, 3: κινούμενο πηνίο λήψης).

Οι διαφορικοί αισθητήρες θέσης ανιχνεύουν την απόσταση την οποία διανύει μια αισθητήρια κεφαλή και όχι την απόλυτη θέση της. Ο πιο κλασικός μαγνητικός αισθητήρας της κατηγορίας είναι η μαγνητική ταινία, όπου μια μαγνητική κεφαλή «διαβάζει» τη μαγνητική ροή καθώς αυτή διέρχεται από την κορυφή της ταινίας. Πρόκειται για μια καλωδιακή συσκευή η οποία έχει κατασκευαστεί από μια σειρά σκληρών μαγνητών των οποίων η διάταξη είναι τέτοια ώστε η διεύθυνση μαγνήτισης να είναι κατακόρυφη. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα των αισθητήρων αυτών κυμαίνονται στο 1μm και 10μm/m, αντίστοιχα, με κόστος της τάξης του 1kEuro/μέτρο. Ο κύριος ανταγωνιστής τους είναι η οπτική ταινία, η οποία έχει παρόμοιες ιδιότητες.

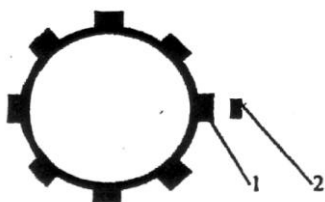


Σχήμα 3.17 Διάταξη ταινίας με μόνιμους μαγνήτες (1: λεπτά υμένια από σκληρό μαγνητικό υλικό, 2: μαγνητική κεφαλή ανίχνευσης).

Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη, η ανάγνωση της απόλυτης θέσης γίνεται με την ταυτόχρονη χρήση πολλών λωρίδων, που διαθέτουν δυαδική ψηφιακή λογική απεικόνισης πολύπλεξης. Αυτή η φαινομενικά δύσκολη έννοια σημαίνει απλά ότι για ένα συγκεκριμένο και κβαντισμένο μήκος μέτρησης, που θα θεωρούμε ως το μοναδιαίο εύρος μέτρησης, έχοντας η λωρίδες, οι οποίες είναι χωρισμένες σε 2, 4, 8, 16, 32, ..., 2^n ζεύγη μαγνητικών περιοχών, είναι δυνατή η ανίχνευση και μέτρηση της θέσης με ευαισθησία της τάξης του $L/2^n$, όπου L είναι το κβαντισμένο μήκος μέτρησης. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι, αν το ελάχιστο μήκος ενός ζεύγος μαγνητικών περιοχών είναι L_q , ήτοι η κάθε μαγνητική περιοχή έχει μήκος ίσο με $L_q/2$, και αν διαθέτουμε η λωρίδες παράλληλης ανάγνωσης, τότε το κβαντισμένο μήκος μέτρησης είναι ίσο με $2^{n-1}L_q$, και η ευαισθησία ανάγνωσης είναι L_q . Για παράδειγμα, οι πλέον απλές τεχνικές μικροηλεκτρονικής λιθογραφίας (βλέπε Κεφάλαιο 10 στις Σημειώσεις Ηλεκτροτεχνίας) μπορούν να επιτύχουν μήκος μαγνητικής περιοχής της τάξης του 1μm. Από την άλλη μεριά, κάνοντας χρήση μαγνητικής ανίχνευσης με κεφαλή video, είναι δυνατή η χρήση 32 καναλιών ή παράλληλων λωρίδων ανάγνωσης. Έτσι, μια μετρητική ταινία με 32 λωρίδες μέτρησης και μήκος μαγνητικής περιοχής ίσο με 1μm, έχει κβαντισμένο μήκος μέτρησης ίσο με 64mm και ευαισθησία ανάγνωσης 1μm. Παρόμοια τεχνική μπορεί να αναπτυχθεί και με οπτική λογική (διαφανείς και αδιαφανείς περιοχές) με διέγερση και ανάγνωση με φωτοτρανσίστορ και φωτοδιόδους αντίστοιχα.

Οι γωνιακοί αισθητήρες, μπορούν να είναι απόλυτοι και διαφορικοί. Η πιο κλασική μορφή αυτού του είδους αισθητήρων είναι ο περιστρεφόμενος δίσκος, όπως αυτός αποτυπώνεται στο **Σχήμα 3.18**. Πρόκειται για διαφορικό αισθητήρα με πλήθος εφαρμογών όπως το σύστημα ABS των αυτοκινήτων. Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: καθώς ο δίσκος που συγκρατεί τους μαγνητικούς οδόντες, περιστρέφεται, η μαγνητική κεφαλή τους μετρά μέσω μιας σειράς παλμών. Επίσης, έχουν προταθεί γωνιακοί αισθητήρες που βασίζονται σε επαγωγικές και άλλες μαγνητικές τεχνικές.

Οι αισθητήρες ταχύτητας καθώς και οι επιταχυντές είτε ανιχνεύουν άμεσα ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα, είτε βασίζονται στον υπολογισμό της απόκρισης απόλυτων ή διαφορικών αισθητήρων θέσης. Ένα είδος διάταξης που χρησιμοποιείται ως μετρητής ταχύτητας ή επιταχυνσιόμετρο είναι και η επαγωγική, όπου με την κίνηση μιας αδρανούς μαγνητικής μάζας στην κορυφή ενός πηνίου δημιουργείται αλλαγή της μαγνητικής ροής στο πηνίο. Στην περίπτωση του επιταχυνσιόμετρου που βασίζεται στην τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, η αλλαγή της ροής στη γραμμή καθυστέρησης προκαλείται από δυναμική κίνηση ενός μόνιμου μαγνήτη, που παίζει και το ρόλο της αδρανούς μάζας.



Σχήμα 3.18 Γωνιακός αισθητήρας θέσης (1: μόνιμοι μαγνήτες σε ακτινική διάταξη, 2: κεφαλή ανίχνευσης πεδίου).

Τέλος ειδική κατηγορία στους αισθητήρες μετατόπισης, αποτελούν τα δилаτόμετρα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία –της τάξης των nm- και πολύ μικρό εύρος μετρήσεων – της τάξης των μικρών. Τυπικά παραδείγματα δилаτομέτρων που βασίζονται σε μαγνητικά υλικά είναι οι διατάξεις LVDT, οι οποίες έχουν ως κύριο ανταγωνιστή τα χωρητικά δилаτόμετρα. Όλες αυτές οι συσκευές μπορούν να είναι καλωδιακές ή ασύρματες.

Μετατόπιση ονομάζεται η μετακίνησή ενός σημείου αναφοράς από μία αρχική θέση προσδιορισμένη στο χώρο, σε μια τελική. Εάν η μετατόπιση γίνεται σε μια ευθεία γραμμή, τότε ονομάζεται *γραμμική μετατόπιση*, ενώ αν γίνεται κατά μία γωνία περιστροφής, τότε λέγεται *γωνιακή μετατόπιση*.

Υπάρχουν αισθητήρες που διαθέτουν την ικανότητα να καταγράψουν αυτά τα είδη κινήσεων. Εάν αυτοί οι αισθητήρες έχουν την ικανότητα να μετρούν τη μετατόπιση ως προς το χρόνο, τότε είναι κατάλληλοι για μέτρηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Αντίστροφα, υπάρχουν όργανα που μετράνε την ταχύτητα ή την επιτάχυνση, από τα οποία είναι δυνατό τελικά να εξαχθεί η μετατόπιση.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις αισθητήρων μετατόπισης περιγράφονται στην ενότητα αυτή.

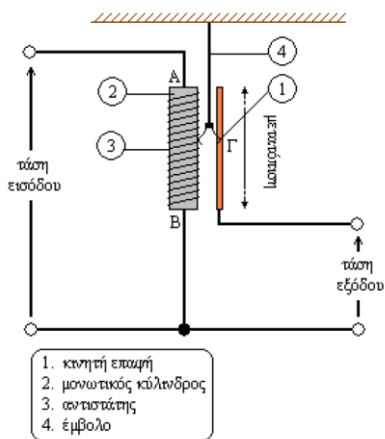
3.4.1.1 Γραμμικό Ποτενσιόμετρο

Το γραμμικό ποτενσιόμετρο αποτελείται από μία επαφή κινητή κατά μήκος ενός στοιχείου που εμφανίζει αντίσταση. Η κινητή επαφή είναι συνδεδεμένη με ένα έμβολο, του οποίου το άκρο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια, η μετατόπιση της οποίας πρόκειται να μετρηθεί. Η τυπική μορφή ενός γραμμικού ποτενσιόμετρου φαίνεται στο **Σχήμα 3.19**.

Η σχεδίαση της διάταξης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση της προβλεπόμενης μέτρησης. Το τμήμα της κινητής επαφής συνήθως κατασκευάζεται από κράματα χαλκού, λόγω της καλής αγωγιμότητάς τους, σε συνδυασμό με τη σχετικά ελαστική συμπεριφορά τους που τους επιτρέπει να διατηρούν καλή ηλεκτρική επαφή με την αντίσταση. Τα στοιχεία που αποτελούν την αντίσταση λέγονται αντιστάτες. Οι αντιστάτες συνήθως κατασκευάζονται από λεπτό σύρμα νικελίου ή λευκόχρυσου που τυλίγεται γύρω από ένα κύλινδρο από μονωτικό υλικό. Εναλλακτικά, οι αντιστάτες μπορούν να κατασκευαστούν από υμένα άνθρακα, μετάλλων ή αγώγιμων πλαστικών για καλύτερη διακριτική ικανότητα. Η

ολίσθηση της κινητής επαφής επάνω στον αντιστάτη γίνεται ομαλά και ομοιόμορφα με τη συνδρομή ενός οδηγού.

Η λειτουργία του γραμμικού ποτενσιομέτρου έχει ως εξής: Εφαρμόζεται μια τάση εισόδου V_1 στα άκρα του αντιστάτη, δηλαδή στα σημεία Α και Β του **Σχήματος 3.19**. Η τάση εξόδου V_0 μετράται μεταξύ της κινητής επαφής στο σημείο Γ και του ενός άκρου του αντιστάτη στο σημείο Β. Η τάση εισόδου V_1 , η τάση εξόδου V_0 και η απόσταση ΒΓ συνδέονται με γραμμική σχέση. Εάν υπάρξει μετατόπιση στη μετρούμενη επιφάνεια, θα κινηθεί αντίστοιχα και το έμβολο, παρασύροντας την κινητή επαφή. Έτσι, θα μεταβληθεί και η απόσταση ΒΓ, μεταβάλλοντας την τάση εξόδου V_0 . Η μεταβολή αυτή γίνεται αντιληπτή με τη βοήθεια ενός βολτομέτρου και μπορεί να ερμηνευθεί, με κατάλληλη βαθμονόμηση, σε μετατόπιση.



Σχήμα 3.19 Διάταξη γραμμικού ποτενσιομέτρου.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από τη μικρή μη γραμμικότητα του κυλίνδρου. Με τη χρήση φθείρονται μηχανικά ο αντιστάτης και η κινητή επαφή, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η απόκρισή τους. Επίσης, η ένδειξη μετατόπισης αλλοιώνεται από την προσθήκη μιας μικρής φυσικής αντίστασης ή ακόμα και από ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα. Τα ποτενσιόμετρα από τυλιγμένο καλώδιο έχουν γραμμικότητα $\pm 1\%$ και αντίσταση που κυμαίνεται από 10Ω έως $200k\Omega$, ενώ τα ακριβέστερα ποτενσιόμετρα υμενίων έχουν γραμμικότητα $\pm 0,01\%$ και αντίσταση από 100Ω έως $1M\Omega$. Η διακριτική ικανότητα του ποτενσιομέτρου τυλιγμένου καλωδίου εξαρτάται από τον αριθμό των περιελίξεων γύρω από τον κύλινδρο. Άμεση ανάγνωση επιτυγχάνεται εύκολα με ένα βολτόμετρο βαθμονομημένο με μονάδες μετατόπισης. Είναι δυνατή, επίσης η ανάγνωση από απόσταση, χρησιμοποιώντας την τάση εξόδου σαν ένα σήμα εισόδου σε ένα άλλο σύστημα μέτρησης. Το κόστος των γραμμικών ποτενσιομέτρων είναι χαμηλό, αλλά δεν διαθέτουν εξαιρετική ακρίβεια.

Η χρησιμοποίησή τους συνηθίζεται στον έλεγχο των διαστάσεων αντικειμένων σε συστήματα ποιοτικού ελέγχου και άλλες εφαρμογές. Εκτός του γραμμικού ποτενσιομέτρου, υπάρχουν και άλλες συσκευές μέτρησης με βάση το ποτενσιόμετρο όπως το λογαριθμικό ποτενσιόμετρο, το ποτενσιόμετρο συνημιτόνου και το περιστροφικό ποτενσιόμετρο.

3.4.1.2 Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT)

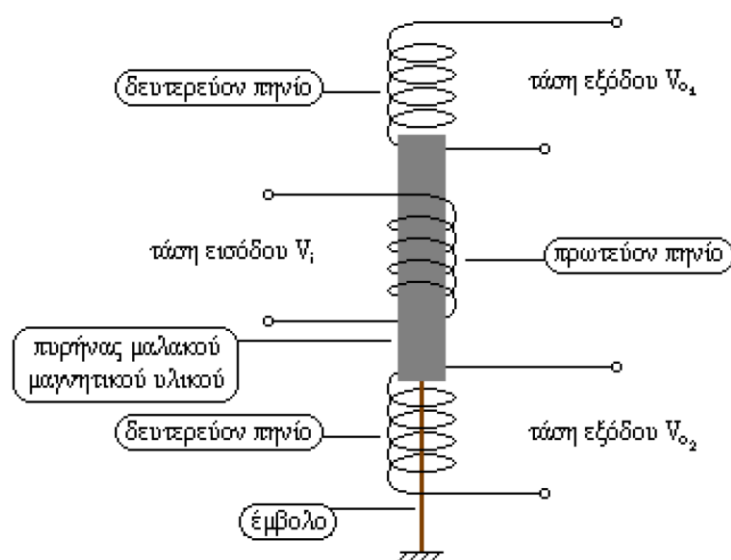
Πρόκειται για τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο αισθητήρα μέτρησης μετατόπισης για μετατοπίσεις έως $300mm$ και συνήθως αποκαλείται LVDT από τα αρχικά της αγγλόφωνης ονομασίας του. Η διάταξη αποτελείται από τρία πηνία, δύο δευτερεύοντα και ένα πρωτεύον, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ένας πυρήνας από μαλακό μαγνητικό υλικό (μαλακό σίδηρο, άμορφο σύρμα FeSiB κ.α.). Τα δευτερεύοντα πηνία έχουν μεταξύ τους αντίθετη περιέλιξη.

Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής: Όταν ένας αγωγός μετακινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε αναπτύσσεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα του, η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής. Συνεπώς, αν εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον πηνίο, τότε αυτό θα παράγει εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και λόγω του νόμου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής θα επαχθεί μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο εξαρτάται από το ποσό του ρεύματος που ρέει στο πρωτεύον πηνίο και το πηλίκο του αριθμού περιελίξεων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο.

Η ονομασία του αισθητήρα περιγράφει την αρχή λειτουργίας του:

- Πρόκειται για *μετασχηματιστή* ο οποίος υπόκειται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.
- Διαθέτει ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία, τα οποία συνδέονται και παρέχουν τη διαφορά των τάσεών τους στις αντίστοιχες εξόδους τους, εξ ου και *διαφορικός*.
- Η μαγνητική σύζευξη ανάμεσα στα πηνία μπορεί να μεταβληθεί επηρεάζοντας το μέγεθος της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης, άρα *μεταβλητός*.
- Ο σχεδιασμός της διάταξης είναι τέτοιος, ώστε η μεταβολή της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των πηνίων να γίνεται γραμμικά, εξ ου και *γραμμικός*.

Στο **Σχήμα 3.20** φαίνεται η απεικόνιση μιας διάταξης LVDT με ένα πρωτεύον πηνίο στο κέντρο και δύο δευτερεύοντα πηνία εκατέρωθεν. Τα πηνία βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Στο κέντρο της διάταξης, εσωτερικά του πρωτεύοντος πηνίου, τοποθετείται ο πυρήνας του μαλακού μαγνητικού υλικού, που είναι ελεύθερος να κινείται κατά μήκος του κεντρικού άξονα. Ο πυρήνας συνδέεται μέσω ενός εμβόλου με το σημείο του οποίου η μετατόπιση θα μετρηθεί. Έτσι, η κίνηση του μετρούμενου σημείου μεταφέρεται στον πυρήνα του μαλακού μαγνητικού υλικού.



Σχήμα 3.20 Τυπική διάταξη LVDT.

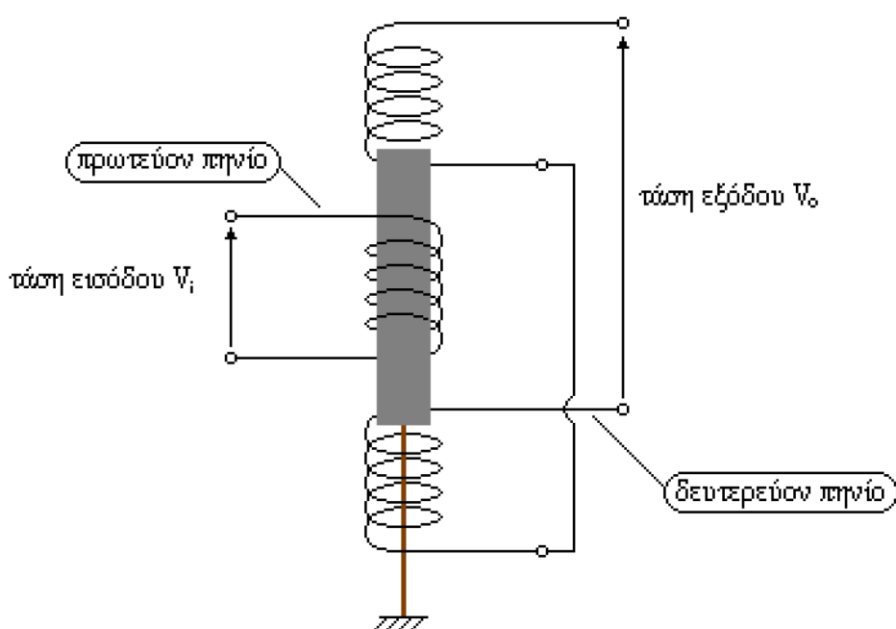
Αν το πρωτεύον πηνίο τροφοδοτηθεί με εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται από αυτό ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη βοήθεια του πυρήνα μαλακού μαγνητικού υλικού προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων. Αν τα

δευτερεύοντα πηνία συνδεθούν όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.21** και δεδομένου ότι ο πυρήνας βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της διάταξης, τα δύο παραγόμενα σήματα από τα δευτερεύοντα πηνία αλληλοαναιρούνται.

Μόλις κινηθεί ο πυρήνας προς κάποια κατεύθυνση, αυτομάτως αυξάνεται η σύζευξη του πρωτεύοντος πηνίου με το πηνίο προς το οποίο κινήθηκε ο πυρήνας και εξασθενεί η σύζευξη με το άλλο. Στο **Σχήμα 3.22** φαίνεται ένα διάγραμμα που αποδίδει τη σχέση του πλάτους της τάσης εξόδου των δευτερευόντων πηνίων V_o – μετατόπισης του πυρήνα.

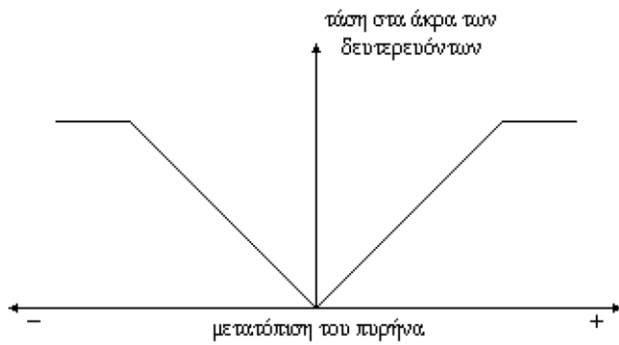
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, όταν ο πυρήνας του μαλακού μαγνητικού υλικού βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης, η τάση στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων είναι μηδενική. Αυτή η τάση αυξάνει με τη μετατόπιση, μέχρι το σημείο που η σύζευξη του πρωτεύοντος πηνίου με το ένα δευτερεύον γίνεται μέγιστη, ενώ με το άλλο μηδενίζεται. Από αυτό το σημείο και έπειτα η τάση εξόδου σταθεροποιείται σε μια τιμή. Αυτό το φαινόμενο λέγεται φαινόμενο του κόρου και εξαιτίας αυτού του φαινομένου περιορίζεται το πρακτικό εύρος λειτουργίας του LVDT.

Τα LVDT είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και παρέχουν διακριτική ικανότητα έως 0,05mm. Το εύρος των μετρούμενων μετατοπίσεων κυμαίνεται από 0,1mm έως 300mm περίπου. Ο πυρήνας δεν έρχεται σε επαφή με τα πηνία και, κατά συνέπεια, δεν παρατηρείται έντονη τριβή ή μηχανική φθορά. Το LVDT έχει ακρίβεια της τάξης του $\pm 0,5\%$ της ένδειξης.



Σχήμα 3.21 Διάταξη LVDT με συνδεδεμένα τα δευτερεύοντα πηνία.

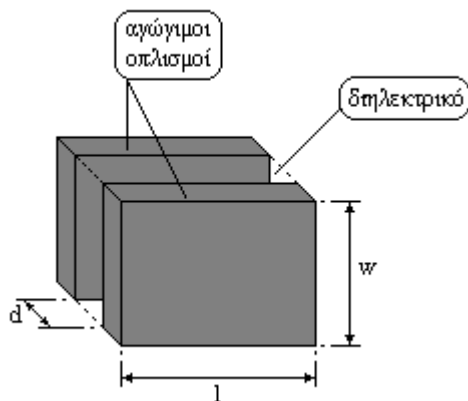
Η συσκευή μέτρησης μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης και να παρέχει συνεχή τάση εξόδου ή να κατασκευαστεί με τρόπο που να αντιμετωπίζει δονήσεις και κρούσεις. Επίσης, τα LVDT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης ή επιτάχυνσης.



Σχήμα 3.22 Διάγραμμα τάσης εξόδου των δευτερευόντων πηνίων V_0 – μετατόπισης του πυρήνα.

3.4.1.3 Μέτρηση μετατόπισης με πυκνωτή μεταβλητού εμβαδού

Πυκνωτής ονομάζεται ένα ηλεκτρικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο αγωγούς, που ονομάζονται οπλισμοί, σε μικρή απόσταση και το υλικό που βρίσκεται ανάμεσά τους, που λέγεται διηλεκτρικό. Ως διηλεκτρικό χρησιμοποιούνται υλικά όπως το γυαλί, η μίκα ή η κηροζίνη, τα οποία αντιστέκονται στην παρουσία ηλεκτρικού πεδίου. Στο **Σχήμα 3.23** φαίνονται οι οπλισμοί ενός πυκνωτή και το διηλεκτρικό. Χαρακτηριστικό του πυκνωτή είναι η χωρητικότητα που εμφανίζει. Χωρητικότητα είναι η ιδιότητα ενός στοιχείου να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3.23 Χωρητική – πυκνωτική διάταξη.

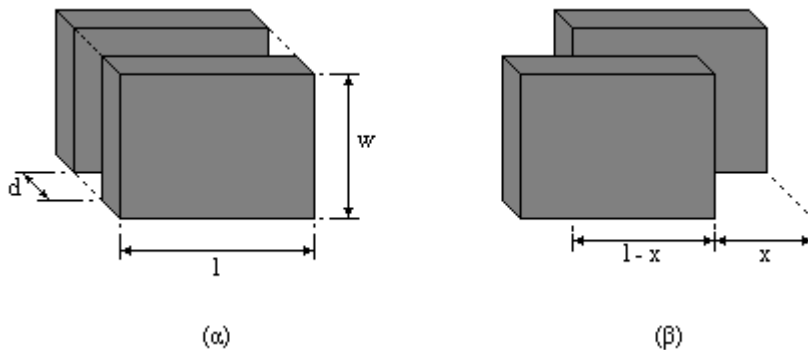
Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το farad (F). Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση (3-15):

$$C = A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / d \quad (3-15)$$

όπου A είναι το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή σε m^2 , ϵ_0 η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του ελεύθερου χώρου και ισούται με $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, ϵ_r είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά ή ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού του διηλεκτρικού και είναι αδιάστατο μέγεθος και d είναι η απόσταση των οπλισμών.

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά ισούται με το πηλίκο της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής μέσα σε ένα υλικό προς την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής που υπάρχει στον ελεύθερο χώρο για την ίδια ένταση ηλεκτρικού πεδίου.

Υπάρχουν συσκευές μέτρησης μετατόπισης, που ονομάζονται *χωρητικοί μετατροπείς μετατόπισης*. Αυτές οι συσκευές βασίζονται στη χρησιμοποίηση πυκνωτών στους οποίους δημιουργείται αλλαγή χωρητικότητας ανάλογη της μετατόπισης. Ο μετατροπέας *μεταβλητής επιφάνειας* στηρίζεται στη μεταβολή της επιφάνειας επικάλυψης των οπλισμών για την αλλαγή της χωρητικότητας.



Σχήμα 3.24 Μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή με τη μετατόπιση.

Στο **Σχήμα 3.24(α)** το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή είναι:

$$A = w \cdot l \quad (3-16)$$

Συνεπώς, η χωρητικότητά του είναι:

$$C_0 = (w \cdot l) \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / d \quad (3-17)$$

Αν ο ένας οπλισμός μετατοπιστεί ως προς τον άλλον κατά απόσταση x όπως στο **Σχήμα 3.24(β)**, τότε το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή είναι:

$$A' = w \cdot (l - x) \quad (3-18)$$

και η χωρητικότητά του είναι:

$$C_x = w \cdot (l - x) \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / d \quad (3-19)$$

Ή

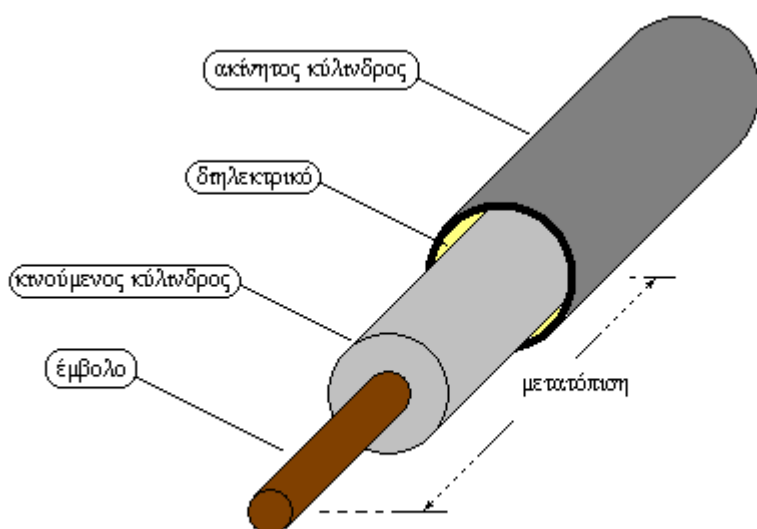
$$C_x = [w \cdot l \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / d] - [w \cdot x \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / d] \quad (3-20)$$

Αφού η αλλαγή χωρητικότητας είναι ανάλογη της αλλαγής της επιφάνειας επικάλυψης, είναι δυνατό να κατασκευαστεί μία συσκευή μέτρησης μετατόπισης που να εκμεταλλεύεται αυτήν ακριβώς την ιδιότητα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο **Σχήμα 3.25**. Οι κύλινδροι που εμφανίζονται στο σχήμα αποτελούν τους οπλισμούς ενός πυκνωτή. Το διηλεκτρικό είναι επενδυμένο στο εσωτερικό του ακίνητου κυλίνδρου. Το έμβολο έρχεται σε επαφή με την προς μέτρηση επιφάνεια. Έτσι, μέσω του εμβόλου μεταφέρεται η μετατόπιση στον κινούμενο

κύλινδρο. Εφόσον κινείται ο εσωτερικός κύλινδρος, μεταβάλλεται το εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών του πυκνωτή και κατά συνέπεια η χωρητικότητά του. Με αυτό τον τρόπο μετράται η μετατόπιση σε κατάλληλα βαθμονομημένο βολτόμετρο. Το σήμα εξόδου που δίνεται στο βολτόμετρο χρειάζεται ειδική ρύθμιση.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι θερμοκρασιακές μεταβολές γιατί επηρεάζουν τη χωρητικότητα του πυκνωτή και εισάγουν σφάλματα στη μέτρηση. Οι χωρητικοί μετατροπείς μετατόπισης χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις μικρών μετατοπίσεων.

Υπάρχουν ορισμένες συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας, υγρασίας ή ραδιενέργειας. Επίσης, υπάρχουν συσκευές που μπορούν να μετρήσουν μετατόπιση μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα του πυκνωτή μέσω αλλαγής της ηλεκτρικής διαπερατότητας ϵ_r του διηλεκτρικού ή της απόστασης d των οπλισμών. Είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι και διαθέτουν άπειρη διακριτική ικανότητα, αλλά ταυτόχρονα έχουν υψηλό κόστος και απαιτούν προσεκτική τοπική ρύθμιση. Εξαιτίας αυτών χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπως είναι η ανίχνευση επιφανειακής μορφολογίας υλικών, η μέτρηση μηχανικής φθοράς ή δημιουργίας ρωγμών σε ένα υλικό κ.α.



Σχήμα 3.25 Χωρητικός μετατροπέας μετατόπισης μεταβλητής επιφάνειας.

3.4.1.4 Οπτικός αισθητήρας μετατόπισης

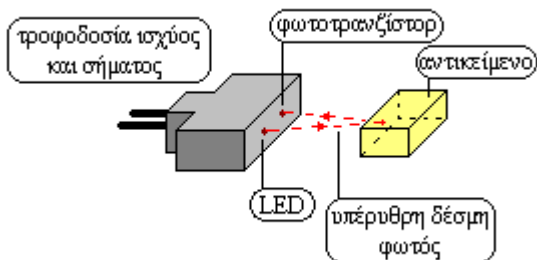
Οι οπτικοί αισθητήρες ή οπτοαισθητήρες αποτελούνται από μία πηγή και έναν ανιχνευτή φωτός. Η πηγή φωτός μπορεί να τοποθετηθεί απέναντι από τον ανιχνευτή. Η μέθοδος μέτρησης κατά την οποία χρησιμοποιείται αυτή η διάταξη, ονομάζεται μέθοδος της *διαπερατότητας*. Κατά τη μέθοδο *ανακλώμενης οπτικής δέσμης* η πηγή φωτός τοποθετείται δίπλα στον ανιχνευτή, ο οποίος λαμβάνει την αντανάκλαση της παραγόμενης δέσμης φωτός.

Οι πηγές φωτός είναι συνήθως δίοδοι φωτοεκπομπής (LED) και οι ανιχνευτές είναι φωτοτρανζίστορ πυριτίου. Το φως που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι οπτικό ή υπέρυθρο. Η εγκατάσταση και συντήρηση της συσκευής είναι πιο εύκολη όταν χρησιμοποιείται οπτικό φως, αλλά με το υπέρυθρο φως επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα, γιατί επηρεάζεται λιγότερο από το φαινόμενο της συμβολής που μπορεί να προκαλέσουν γειτονικές πηγές φωτός.

Όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες διαπερατότητας, η πηγή φωτός εκπέμπει ορατό κόκκινο ή υπέρυθρο φως το οποίο λαμβάνει ο ανιχνευτής που έχει τοποθετηθεί απέναντι. Αν

παρεμβληθεί κάποιο αντικείμενο, η λήψη της δέσμης φωτός από τον ανιχνευτή διακόπτεται και με αυτόν τον τρόπο διαπιστώνεται η ύπαρξη του αντικειμένου.

Στο **Σχήμα 3.26** εμφανίζεται μία διάταξη αισθητήρα ανακλώμενης οπτικής δέσμης. Η δέσμη φωτός που εκπέμπεται από τη δίοδο φωτοεκπομπής ανακλάται επάνω στο αντικείμενο και ανιχνεύεται από το φωτοτρανζίστορ.



Σχήμα 3.26 Οπτικός αισθητήρας με μέθοδο ανακλώμενης οπτικής δέσμης.

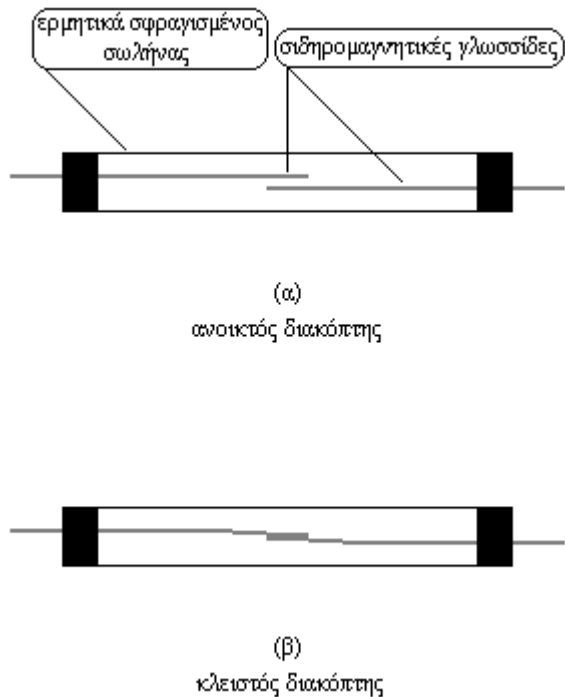
Η επιφάνεια του αντικειμένου που ελέγχεται με αυτή τη διαδικασία συνήθως καλύπτεται με ειδική ανακλαστική επίστρωση προκειμένου να μειώνονται τα σφάλματα της μέτρησης. Επίσης, η μετάδοση του φωτός μπορεί να γίνεται με τη μορφή παλμών και να υπάρχει ειδικό φιλτράρισμα, ώστε να ελαττώνεται η πιθανότητα εσφαλμένων ενδείξεων. Κατά τη μέθοδο της ανακλώμενης οπτικής δέσμης η ύπαρξη και η ισχύς της ανακλώμενης δέσμης μπορεί να ερμηνευθεί κατάλληλα, ώστε να παρέχει πληροφορίες για την απόσταση του αντικειμένου.

Η ισχύς της εκπεμπόμενης δέσμης φωτός καθορίζει την ελάχιστη απόσταση προσέγγισης, στην οποία λειτουργεί ο αισθητήρας. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν και η ευαισθησία του φωτοτρανζίστορ, καθώς και η φύση του ελεγχόμενου αντικειμένου. Για τη μέθοδο ανάκλασης η απόσταση κυμαίνεται από 1mm μέχρι 7mm και σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνει και αυτά τα όρια. Οι οπτικές ίνες εξυπηρετούν στην εφαρμογή της τεχνικής σε σημεία απρόσιτα από άλλους αισθητήρες. Ο ανιχνευτής φωτός έχει δική του τροφοδοσία και παράγει κατάλληλη τάση εξόδου, η οποία συνήθως χρειάζεται ενίσχυση, αλλά επιτρέπει τη λήψη ενδείξεων από απόσταση. Σε πιο σύγχρονα μοντέλα παρέχεται και ένδειξη της απόστασης. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα συναγερμού και στον έλεγχο ποιότητας, κατά την παραγωγική διαδικασία.

3.4.1.5 Αισθητήρας Διακόπτη Με Γλωσσίδα

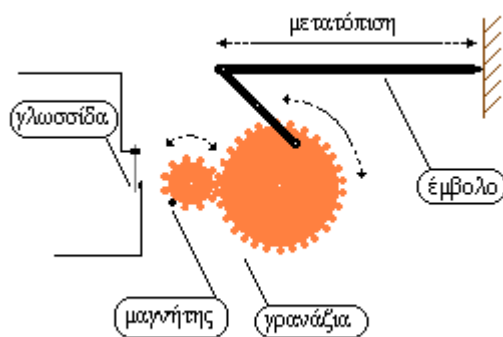
Μια τυπική διάταξη ενός διακόπτη με γλωσσίδα αποτελείται από δύο μικρές σιδηρομαγνητικές γλωσσίδες κλεισμένες ερμητικά μέσα σε ένα λεπτό γυάλινο σωλήνα. Στο **Σχήμα 3.27** φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός διακόπτη με γλωσσίδα.

Οι γλωσσίδες είναι λεπτές και ευλύγιστες και μαγνητίζονται εύκολα με την παρουσία μαγνητικού πεδίου, επειδή είναι σιδηρομαγνητικές. Συνήθως συναντιούνται δύο τύποι διακόπτη με γλωσσίδα. Ο πρώτος χαρακτηριστικός τύπος διακόπτη έχει δύο γλωσσίδες όπως περιγράφηκε, τα άκρα των οποίων έλκονται και έρχονται σε επαφή, κλείνοντας ένα κύκλωμα, όταν περάσει ένας μαγνήτης από μικρή απόσταση. Ο δεύτερος τύπος διακόπτη διαθέτει μία εύκαμπτη γλωσσίδα μεταξύ δύο επαφών. Αρχικά, η γλωσσίδα εφάπτεται στη μία επαφή, οπότε το κύκλωμα είναι ανοικτό. Μόλις περάσει ένας μαγνήτης από μικρή απόσταση, η γλωσσίδα μετακινείται προς την άλλη επαφή και κλείνει ένα κύκλωμα μέχρι να απομακρυνθεί ο μαγνήτης, οπότε επιστρέφει στην αρχική της θέση.



Σχήμα 3.27 Αισθητήρας Διακόπτη με Γλωσσίδα.

Με αυτή τη διάταξη προσδιορίζεται εύκολα η γωνιακή περιστροφή ενός άξονα. Εάν τοποθετηθεί ένας μόνιμος μαγνήτης στον άξονα και ο διακόπτης στερεωθεί κοντά του, περιστρέφοντας τον άξονα, ο μαγνήτης θα περνάει περιοδικά κοντά από τον διακόπτη. Έτσι, η γλωσσίδα θα κλείνει περιοδικά ένα κύκλωμα δίνοντας μία έξοδο με παλμική μορφή. Με κατάλληλη επεξεργασία της εξόδου προσδιορίζεται η γωνιακή μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Με μια λίγο πιο σύνθετη κατασκευή, όπως του **Σχήματος 3.28** είναι δυνατή και η απευθείας μέτρηση γραμμικής μετατόπισης.



Σχήμα 3.28 Μέτρηση μετατόπισης από αισθητήρα με γλωσσίδα.

Το έμβολο τοποθετείται στην επιφάνεια που πρόκειται να μετρηθεί. Οποιαδήποτε μετακίνησή της μεταφέρεται μέσω του εμβόλου στο γρανάζι, το οποίο περιστρέφεται και παράλληλα περιστρέφει το μικρότερο γρανάζι. Με κατάλληλη διάταξη γραναζιών η κίνηση καταλήγει σε ένα γρανάζι, όπου έχουν στερεωθεί ένας ή περισσότεροι μαγνήτες σε έναν ή

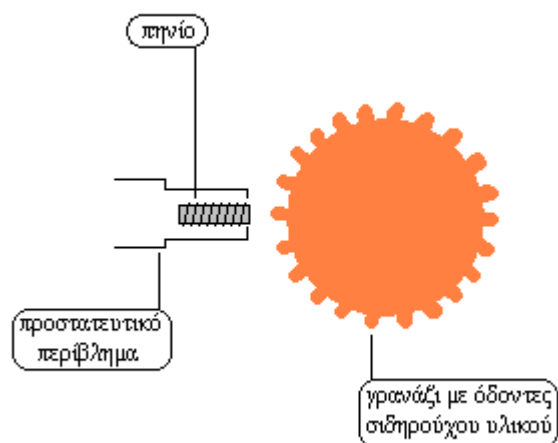
περισσότερους οδόντες του αντίστοιχα. Ο μαγνήτης περνάει περιοδικά κοντά σε ένα διακόπτη με γλωσσίδα και έτσι προκαλεί το περιοδικό κλείσιμο ενός κυκλώματος. Το κύκλωμα παράγει μία έξοδο με μορφή παλμών, η οποία δίνει πληροφορίες για τη μετατόπιση.

Η απόσταση του μαγνήτη από τις γλωσσίδες καθορίζεται με βάση την ισχύ του μαγνήτη, το υλικό κατασκευής των γλωσσίδων και την απόστασή τους όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό. Η ταχύτητα λειτουργίας του διακόπτη μπορεί να είναι μικρότερη από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου. Οι γλωσσίδες που βρίσκονται εντός του σωλήνα δεν επηρεάζονται από τις εξωτερικές συνθήκες, όπως την υπάρχουσα σκόνη και άρα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση σε σχέση με άλλα είδη διακοπών. Χρειάζονται προστασία όμως, από τυχόν δονήσεις ή κρούσεις, γιατί πρόκειται για εύθραυστες συσκευές.

Οι διακόπτες με γλωσσίδα είναι σχετικά φθηνοί και οι κυριότερες εφαρμογές που βρίσκουν είναι στα ποδήλατα, όπου υπολογίζουν ταχύτητα και απόσταση, σε συστήματα αυτόματου κλειδώματος, σε συστήματα συναγερμού και αλλού.

3.4.1.6 Γωνιόμετρο Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

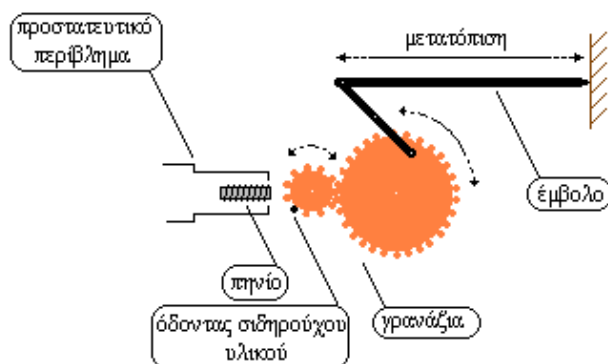
Πρόκειται για μικρές μαγνητικές συσκευές, οι οποίες αποτελούνται από ένα μικρό πηνίο στερεωμένο σε σταθερό σημείο κοντά σε ένα τροχό που μπορεί να περιστραφεί. Το πηνίο βρίσκεται μέσα σε προστατευτική θήκη. Οι αισθητήρες προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση γωνιακής απόκλισης. Στο **Σχήμα 3.29** δίνεται η απεικόνιση ενός τέτοιου αισθητήρα.



Σχήμα 3.29 Αισθητήρας προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Τα δόντια του γραναζιού είναι κατασκευασμένοι από σιδηρούχο υλικό και έτσι γίνεται ανιχνεύσιμη η ύπαρξή τους από το πηνίο. Κάθε φορά που περνάει ένας όδοντας κοντά από το πηνίο, μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο γύρω του και παράγεται μία τάση εξόδου, η οποία μπορεί να ληφθεί στην οθόνη βολτομέτρου ή αμπερομέτρου με τη μορφή παλμού. Ανάλογα με τον αριθμό των παλμών μπορεί να προσδιοριστεί η γωνιακή περιστροφή. Αν αναχθεί αυτός ο αισθητήρας σε μια διάταξη αντίστοιχη του **Σχήματος 3.29**, θα ήταν δυνατή η μέτρηση γραμμικής μετατόπισης. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο **Σχήμα 3.30**. Τυπικοί αισθητήρες αυτού του τύπου ανιχνεύουν σιδηρομαγνητικά υλικά σε αποστάσεις έως 2,5mm. Έχουν πολλές εφαρμογές, οι κυριότερες από τις οποίες είναι η ανίχνευση της γωνίας ενός άξονα, ο χρόνος ανάφλεξης ή η ταχύτητα σε κινητήρες, ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκληρούς ή μαλακούς δίσκους υπολογιστών. Το μικρό τους μέγεθος είναι σημαντικό πλεονέκτημα, αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που δεν είναι δυνατή η

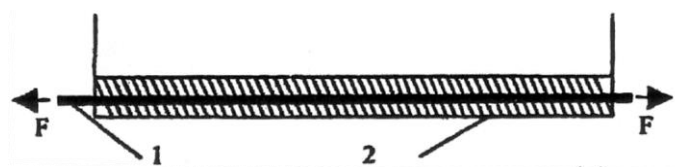
χρήση άλλων αισθητήρων λόγω του μεγέθους τους. Αρκετές διατάξεις αυτού του αισθητήρα δε χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία για να λειτουργήσουν, ενώ άλλες σφραγίζονται μέσα σε θήκες, όπου προστατεύονται από ακραίες θερμοκρασίες και πιέσεις, καθώς και δραστικές χημικές ουσίες. Το κόστος τέτοιων συσκευών είναι χαμηλό, αλλά η λειτουργία τους επηρεάζεται από την ύπαρξη ανεπιθύμητων σημάτων θορύβου.



Σχήμα 3.30 Μέτρηση μετατόπισης από αισθητήρα προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

3.4.2 Αισθητήρες Μάζας

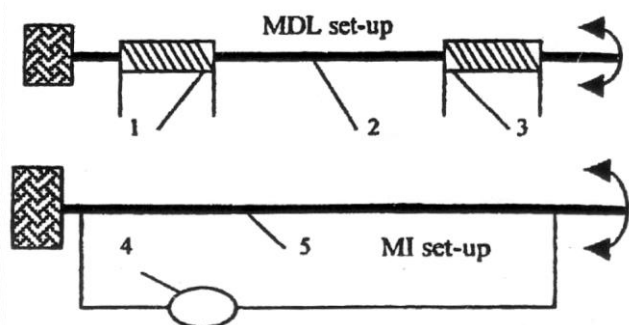
Στην κατηγορία των αισθητήρων μάζας συμπεριλαμβάνονται οι κυψέλες φορτίου (load cells), οι αισθητήρες πίεσης (pressure sensors), οι μετρητές ροπής καθώς και τα ροόμετρα (flow meters) με τα ροόμετρα μάζας, ως παράγωγες εφαρμογές. Οι συσκευές αυτές μπορούν να ανιχνεύουν έμμεσα τις εφαρμοζόμενες τάσεις βασιζόμενοι σε μετρήσεις αισθητήρων θέσης ή αισθητήρων μηχανικής τάσης. Φυσικά υπάρχουν διατάξεις με μαγνητικά υλικά, οι οποίες μπορούν να ανιχνεύουν άμεσα τις εφαρμοζόμενες τάσεις και συνεπώς να υπολογίζουν φορτίο, πίεση και ροπή στρέψης. Οι κυψελίδες φορτίου που μετρούν άμεσα εφελκυστικές τάσεις είναι κυρίως επαγωγικές διατάξεις, στις οποίες ως πυρήνας χρησιμοποιείται ένα ευαίσθητο σε τέτοιου είδους τάσεις υλικό, όπως λόγου χάρη θετικά μαγνητοσυστολικά υλικά. Η διαπερατότητα μειώνεται καθώς εφαρμόζεται τάση, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αντίστοιχη μείωση στην έξοδο της διάταξης. Τέτοιου είδους διατάξεις έχουν εφαρμοστεί και σε επιταχυνσιόμετρα. Έχει προταθεί και διάταξη MDL για κυψελίδα φορτίου στην οποία τέτοια τεταμένα υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε σύζευξη με τη γραμμή καθυστέρησης. Με τη διάταξη του MDL επιτεύχθηκαν καλύτερα επίπεδα ευαισθησίας και αβεβαιότητας, της τάξης των 10-100ppm και 100-300ppm, αντίστοιχα, και με κόστος 1kEuro/αισθητήρα.



Σχήμα 3.31 Επαγωγική διάταξη αισθητήρα εφελκυσμού (1: πυρήνας από μαλακό μαγνητικό υλικό, 2: πηνίο διέγερσης).

Παράλληλα με χρήση διατάξεων MDL έχουν πραγματοποιηθεί άμεσες μετρήσεις πιέσεων. Η πίεση μετρήθηκε πάνω στο στοιχείο της γραμμής καθυστέρησης. Η ευαισθησία

και η αβεβαιότητα των συσκευών αυτών κυμαίνονται στα 10rpm και 100rpm, αντίστοιχα, με κόστος 1kEuro/αισθητήρα. Η μονοτονική και μη υστερητική απόκριση αυτών των αισθητήρων δεν ήταν ικανές να εξασφαλίσουν την εμπορική τους εκμετάλλευση εξαιτίας του μεγάλου ανταγωνισμού με τις συσκευές με πιεζοηλεκτρικά υλικά. Το κόστος παραγωγής τους δεν είναι συγκρίσιμο με την προαναφερθείσα τεχνική, παρά το γεγονός ότι η απόκριση του MDL έχει σαφές πλεονέκτημα. Για μετρήσεις στρεπτικών τάσεων χρησιμοποιούνται προανοπτημένα μαγνητικά υλικά, τα οποία υποβάλλονται σε στρέψη. Για την εφαρμογή αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης καθώς και οι διατάξεις MDL, με εξίσου ανταγωνιστικές ιδιότητες. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα των συσκευών αυτών είναι περίπου 100rpm και 1000rpm, αντίστοιχα, με κόστος 1kEuro/αισθητήρα. Όσον αφορά τους αισθητήρες ροής ευρέως γνωστές στη βιομηχανία είναι οι συσκευές που βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές.



Σχήμα 3.32 Διάταξη MDL και μαγνητο – εμπέδησης για έλεγχο στρεπτικών τάσεων (1: κινούμενο πηνίο διέγερσης, 2: MDL, 3: κινούμενο πηνίο λήψης, 4: εναλλασσόμενο κύκλωμα διέγερσης, 5: στοιχείο μαγνητο – αντίστασης).

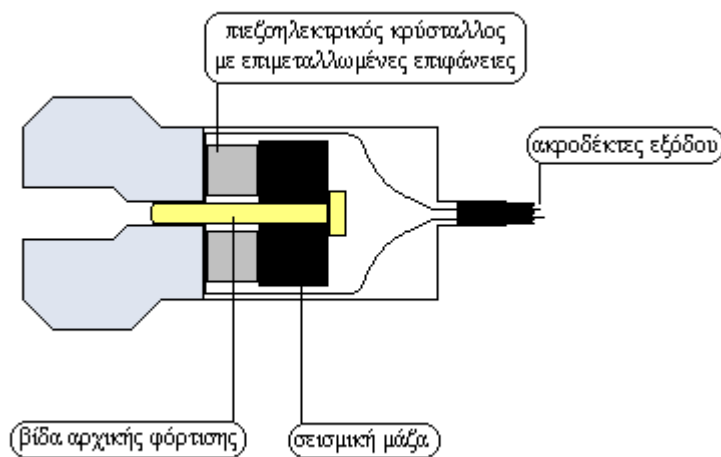
3.4.2.1 Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να εμφανίζουν τάση στα άκρα τους, όταν ασκείται σε αυτά μηχανική καταπόνηση με τη μορφή θλίψης ή εφελκυσμού. Τα υλικά που έχουν αυτή την ιδιότητα ονομάζονται πιεζοηλεκτρικά και ισχύει για αυτά και η αντίστροφη διαδικασία. Αν, δηλαδή, εφαρμοστεί τάση στα άκρα ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού, τότε αυτό θα παραμορφώνεται ανάλογα με τη φορά του δυναμικού. Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό καταπονείται διαδοχικά σε εφελκυσμό και θλίψη, παράγει εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του.

Το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο είναι πολύ διαδεδομένο. Στο **Σχήμα 3.33** φαίνεται η τυπική του διάταξη που αποτελείται από μία μάζα συνδεδεμένη με ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο με επιμεταλλωμένες επιφάνειες που καταλήγουν σε δύο ακροδέκτες.

Όταν η συσκευή επιταχύνεται, η μάζα μετακινείται και καταπονεί τον κρύσταλλο θλιπτικά αν επιταχύνεται ή εφελκυστικά αν επιβραδύνεται. Έτσι παράγεται αντίστοιχη τάση στα άκρα του κρυστάλλου, η οποία είναι ανάλογη της επιτάχυνσης και μέσω των ακροδεκτών μεταφέρεται σε ένα κατάλληλα βαθμονομημένο βολτόμετρο. Εισάγοντας και άλλα δεδομένα στους υπολογισμούς μπορούν να προσδιοριστούν και άλλες παράμετροι, όπως η μετατόπιση.

Για τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως πιεζοηλεκτρικά όπως ο χαλαζίας και το τρυγικό νάτριο ή κάλιο, επειδή έχουν μικρό κόστος και υψηλή μηχανική αντοχή. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα έχουν υψηλές τάσεις εξόδου, οι οποίες όμως, συνοδεύονται από ηλεκτρικό θόρυβο. Είναι αρκετά εύχρηστες συσκευές, καθώς είναι μικρές, ελαφριές και αντέχουν αρκετά υψηλές επιταχύνσεις της τάξης των 250000 m/sec².



Σχήμα 3.33 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.

3.4.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες: τους αισθητήρες πλατίνας (Pt temperature sensors), τα θερμοζεύγη και τα thermistors.

3.4.3.1 Αισθητήρια πλατίνας

Τα αισθητήρια πλατίνας στηρίζονται στη γραμμική μεταβολή της ειδικής αντίστασης της πλατίνας συναρτήσει της θερμοκρασίας και έχουν ένα μεγάλο εύρος μέτρησης. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα της μέτρησης με έναν τέτοιον αισθητήρα μεγαλώνει με την καθαρότητά του. Έτσι, μπορούν να βρεθούν οι αισθητήρες υπερκαθαρής πλατίνας με αβεβαιότητα 1 mK.

3.4.3.2 Θερμοζεύγη

Τα θερμοζεύγη είναι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Seebeck. Οι αισθητήρες αυτοί δεν έχουν γραμμική απόκριση και είναι ευαίσθητοι σε ορισμένα εύρη μέτρησης.

3.4.3.3 Thermistor

Το όνομα *thermistor* επινοήθηκε ως αρκτικόλεξο για την περιγραφή ενός στοιχείου των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που έχει αξιοσημείωτη μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία σε μία εκτεταμένη περιοχή θερμοκρασιών "*thermally-sensitive-resistor*". Αυτές οι συσκευές αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1940 ως αποτέλεσμα της έρευνας των ιδιοτήτων των οξειδίων των μετάλλων που έχουν αναμιχθεί μη στοιχειομετρικά και στις οποίες, σε ορισμένες περιπτώσεις, ίχνη ακαθαρσιών έχουν προστεθεί σε πολύ μικρές ποσότητες. Τα αποτελέσματα των διαφόρων αναμειξεων ήταν η ανάπτυξη συσκευών που σύντομα έγιναν εμπορικά διαθέσιμες από ένα μεγάλο αριθμό εταιρειών. Οι συσκευές αυτές είχαν μεγάλη εξάπλωση επειδή η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους μεταβαλλόταν κατά 4 και 5% ανά βαθμό Κελσίου που ήταν αρκετά μεγαλύτερη από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο ή κράμα μετάλλου. Επιπλέον, επειδή τα οξείδια των μετάλλων είναι ημιαγώγιμα, αντιθέτως με τα μέταλλα, μία μεγάλη γκάμα τιμών της αντίστασης ήταν διαθέσιμη.

Στη δεκαετία του 1950 ανακαλύφθηκε ότι το κεραμικό τιτανικό βάριο έχει ημιαγώγιμες ιδιότητες, όταν μικρές ποσότητες είτε βαρίου είτε τιτανίου αντικατασταθούν από άτομα με παρόμοια ακτίνα και μεγαλύτερο σθένος. Επιπλέον, σε μία περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, πάνω από το σημείο Curie, έχουμε μία αξιοσημείωτη άνοδο της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία, της τάξης 15% ανά °C. Φαίνεται λοιπόν λογικό ότι

και αυτό το υλικό, στη μορφή συσκευής, να μπορεί να χαρακτηριστεί ως thermistor, αλλά για αρκετό καιρό ο όρος χρησιμοποιούνταν μόνο για συσκευές που είχαν μείωση της αντίστασης με τη θερμοκρασία. Στις μέρες μας, όμως, ο όρος thermistor είναι γενικός. Συσκευές με μείωση της αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας λέγονται NTC (Negative temperature Coefficient of Resistant) και συσκευές που έχουν αύξηση της αντίστασης με τη θερμοκρασία ονομάζονται PTC (Positive temperature Coefficient of Resistance). Η έρευνα στα οξείδια των NTC thermistors δεν έχει οδηγήσει σε κάποια αύξηση της μεταβολής της αντίστασης, έχει όμως παρατηρηθεί ανώμαλη συμπεριφορά σε συγκεκριμένη μείξη οξειδίων που περιέχουν το Vd_2O_5 ως συστατικό. Σ' αυτό το υλικό παρατηρούμε μείωση της ειδικής αντίστασης κατά 100% ανά $^{\circ}C$ για μια πολύ συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών περίπου στους $68^{\circ}C$. Περαιτέρω έρευνα είναι δυνατόν να δημιουργήσει τέτοια συμπεριφορά και σε άλλες θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά. Τέτοια έρευνα έχει γίνει και έχει οδηγήσει σε ραγδαία εξέλιξη των PTC τιτανικού βαρίου thermistors στο οποίο μπορεί να προστεθεί τιτανικός μόλυβδος ή τιτανικό στρόντιο σε μικρές ποσότητες με ελεγχόμενο τρόπο. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η κατασκευή thermistor με μεταβολή της ειδικής αντίστασης κατά 60% ανά $^{\circ}C$ σε μικρή περιοχή θερμοκρασιών (μερικούς δεκάδες βαθμούς). Η μεταβολή αυτή μπορεί να λαμβάνει χώρα από τους $-100^{\circ}C$ μέχρι τους $350^{\circ}C$ ανάλογα με την περιεκτικότητα σε τιτανικό στρόντιο ή μόλυβδο. Επίσης, έχουν παρασκευαστεί NTC και PTC υλικά με μικρή μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία ($<2\%$ ανά $^{\circ}C$) και βρίσκουν εφαρμογές σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις.

Για τους συνηθισμένους NTC thermistors η εξάρτηση της αντίστασης με τη θερμοκρασία ακολουθεί ένα εκθετικό νόμο. Αυτό συμβαίνει και στους μονοκρυσταλλικούς thermistors καρβιδίου του πυριτίου, οι οποίοι έχουν εφαρμογές από τους $-100^{\circ}C$ έως τους $300^{\circ}C$. Οι PTC thermistors είναι κατασκευασμένοι από δύο ειδών υλικά: συνδυασμούς υλικών που έχουν ως βάση τη δομή του τιτανικού βαρίου (ένα άλλο εμπορικό όνομα γι' αυτούς είναι Posistors) και ημιαγωγούς με τη μορφή διαμαντιού, όπως το πυρίτιο (ένα άλλο όνομα είναι Silistors). Το φάσμα θερμοκρασίας που οι thermistors τιτανικού βαρίου είναι λειτουργικοί εξαρτάται από τη σύνθεσή του. Οι thermistors που έχουν την κρυσταλλική δομή του διαμαντιού έχουν μικρή μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία ($\approx 0,8\%$ ανά $^{\circ}C$ για το πυρίτιο), αλλά είναι πιο εφαρμόσιμη για μια ευρύτερο φάσμα θερμοκρασίας.

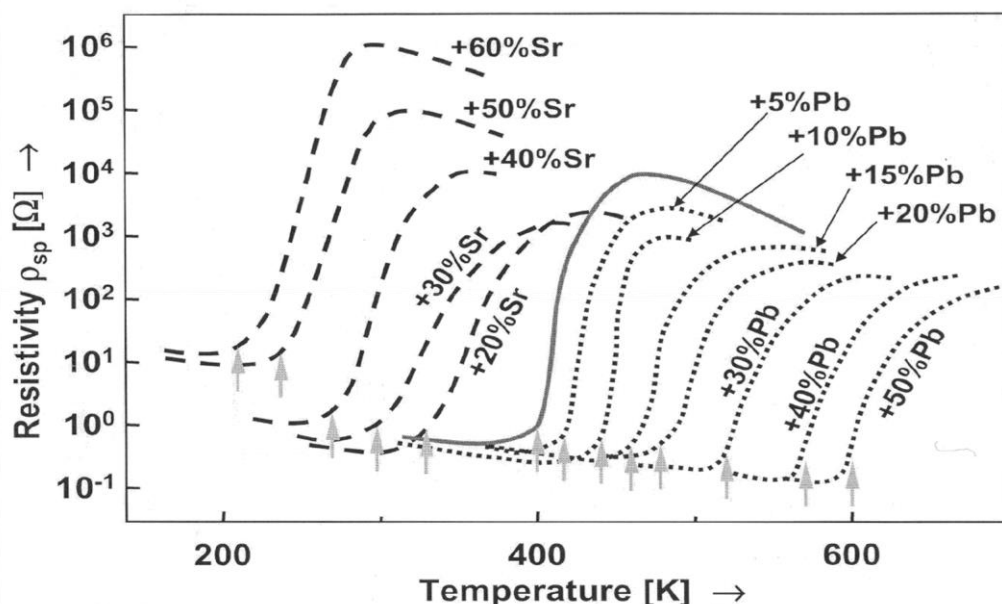
Η βασική ιδιότητα των υλικών των thermistors είναι η σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας. Όμως, η θερμοκρασία του υλικού μπορεί να επηρεαστεί με διάφορους τρόπους. Ο ένας είναι από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Άλλος είναι από θέρμανση εξαιτίας της εσωτερικής ενέργειας, που μπορεί να είναι αποτέλεσμα της σύνδεσης της συσκευής σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συνήθως στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Επιπλέον, όταν έχουμε μεγάλη θέρμανση τέτοιας μορφής, η θερμοκρασία του υλικού δεν είναι σταθερά για δοσμένη εσωτερική ενέργεια, αφού η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το περιβάλλον.

Το τιτανικό βάριο ($BaTiO_3$), που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μη αγωγίμο κεραμικό, επιδεικνύει μία έντονη αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης σε μία σχετικά μικρή περιοχή θερμοκρασίας. Μία μεγάλη ποικιλία thermistors είναι διαθέσιμη, στην οποία το υλικό είναι ένα μίγμα από τιτανικό βάριο-στρόντιο-μόλυβδο. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία για διαφορετικές αναλογίες τιτανικού στρόντιου και τιτανικού μολύβδου στο τιτανικό βάριο.

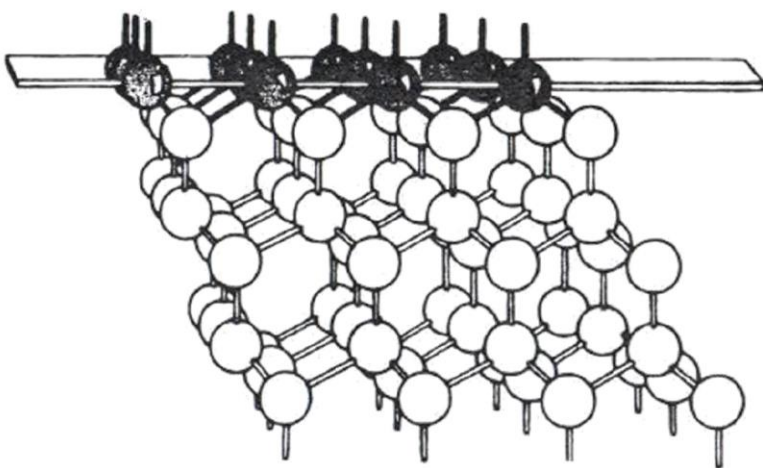
Η ημιαγωγή συμπεριφορά δημιουργείται από την αντικατάσταση ατόμων, βαρίου από στοιχεία που έχουν παρόμοιο μέγεθος ιόντος με το Ba^{2+} και σθένος μεγαλύτερο από δύο ή από στοιχεία με παρόμοια ιοντική ακτίνα με το Ti^{4+} και σθένος μεγαλύτερο του 4. Για παράδειγμα, η χρησιμοποίηση Sb^{3+} σε μικρές συγκεντρώσεις (0,3 άτομα %) προκαλούν την αλλαγή του σθένους στα γειτονικά ιόντα τιτανίου από +4 σε +3. Αυτό σημαίνει ότι από τα

ίόντα αυτά ένας αριθμός πλεονάζοντος, ίσος με τον αριθμό των ιόντων, παράγονται και είναι ελεύθερα να κινηθούν στο πλέγμα. Συνεπώς, έχουμε ημιαγωγιμότητα n-τύπου και μία ειδική αντίσταση της τάξης των $30\Omega\text{ cm}$ σε θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Το BaTiO_3 είναι ένα πολυκρυσταλλικό κεραμικό υλικό. Σε τέτοια υλικά το περιβάλλον των ατόμων στα όρια των κόκκων είναι πολύ διαφορετικό με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αντίστοιχα, στην περιοχή αυτή του κόκκου, η ενέργεια των ηλεκτρονίων και γενικότερα η συμπεριφορά των φορέων. Συγκεκριμένα, στα άτομα των ορίων του κόκκου πολλοί δεσμοί μένουν ασυμπλήρωτοι από ηλεκτρόνια, αφού δεν υπάρχουν αντίστοιχα γειτονικά άτομα προς την εξωτερική πλευρά.



Σχήμα 3.34 Καμπύλες ειδικής αντίστασης θερμοκρασίας τιτανικού βαρίου-στροντίου-μολύβδου.



Σχήμα 3.35 Τα άτομα στην εξωτερική επιφάνεια ενός κρυστάλλου τετρασθενούς στοιχείου. Δείχνονται η μία από τις τέσσερις κατευθύνσεις των τροχιακών σθένους των ατόμων, που, καθώς μένουν αδέσμευτα, είναι προσανατολισμένα προς το χώρο έξω από το κρύσταλλο.

Δημιουργείται έτσι μια ενεργειακή στάθμη επιφάνειας από αποδέκτες, που βρίσκεται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του διαγράμματος των ενεργειακών ζωνών του ημιαγωγού.

Η πυκνότητα των αποδεκτών στη στάθμη επιφανείας είναι όση και των ατόμων στην επιφάνεια ενός κόκκου.

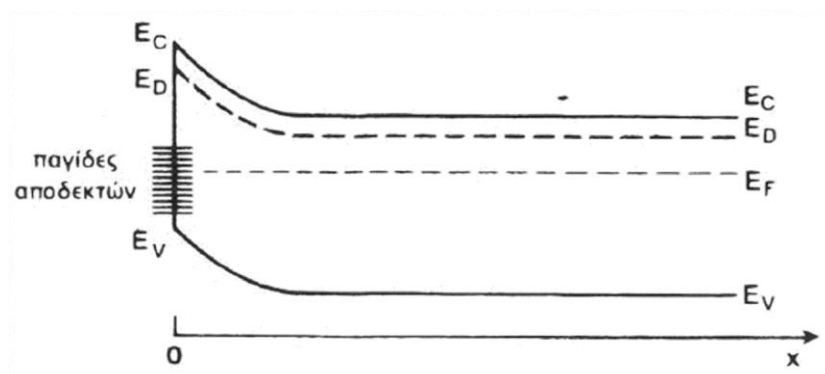
Αυτό οφείλεται στην τάση των αποδεκτών της στάθμης επιφανείας να μετατρέψουν την επιφανειακή περιοχή του κρυστάλλου σε p-τύπου ημιαγωγό, ανεξάρτητα από το χαρακτήρα του εσωτερικού του (ενδογενής, p-τύπου ή n-τύπου). Πρακτικά αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένα φράγμα δυναμικού στα όρια των κόκκων που πρέπει να ξεπεράσουν οι φορείς αγωγιμότητας για να κινηθούν στον επόμενο κόκκων.

Το τιτανικό βάριο είναι σιδηροηλεκτρικό υλικό. Αυτό σημαίνει πως παρατηρείται μία αυθόρμητη πόλωση στους κόκκους. Οι φορείς πόλωσης στα όρια του κόκκου έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση αυτού του φράγματος δυναμικού με αποτέλεσμα η κίνηση των φορέων αγωγιμότητας να γίνεται πιο εύκολα και συνεπώς η τιμή της αντίστασης του υλικού να μην είναι τεράστια.

Πάνω από τη θερμοκρασία Curie, όμως, όπου το υλικό δεν είναι πλέον σιδηροηλεκτρικό και χάνεται η αυθόρμητη πόλωση, το φράγμα δυναμικού στα όρια των κόκκων μεγαλώνει, οπότε γίνεται πιο δύσκολη η κίνηση των φορέων αγωγιμότητας διάμεσου των κόκκων άρα η τιμή της ειδικής αντίστασης αυξάνεται. Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται και η πολύ μεγάλη αύξηση της τιμής της αντίστασης σε μια πολύ μικρή περιοχή θερμοκρασίας (κοντά στη θερμοκρασία Curie).

Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο του Heywang, η ειδική αντίσταση ρ_c του υλικού πάνω από τη θερμοκρασία Curie εξαρτάται εκθετικά από το φράγμα δυναμικού ϕ στα όρια του κόκκου:

$$\rho_c = \rho_o \exp\left(\frac{e\phi}{KT}\right) \quad (3-21)$$



Σχήμα 3.36 Η παράλληλη κάμψη της κορυφής της ζώνης σθένους και του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας κοντά στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού n-τύπου, σαν αποτέλεσμα της ζώνης αποδεκτών σε στάθμες επιφανείας. Ο άξονας x κατευθύνεται από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του στερεού.

Όπου ρ_o μία σταθερά, e το φορτίο του ηλεκτρονίου και K η σταθερά Boltzmann. Το φράγμα δυναμικού σε περιπτώσεις με μικρές τάσεις είναι:

$$\phi_0(\phi_0, T) = \frac{en_c^2}{8\epsilon_0\epsilon_{gb}(T)N_D} \quad (3-22)$$

Όπου n_c η πυκνότητα των παγιδευμένων ηλεκτρονίων στα όρια των κόκκων, N_D η συγκέντρωση φορέων αγωγιμότητας, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά στο κενό και $\epsilon_{gb}(T)$ η διηλεκτρική σταθερά στα όρια των κόκκων. Πάνω από τη θερμοκρασία Curie, η διηλεκτρική σταθερά ακολουθεί τον νόμο των Curie-Weiss, σύμφωνα με τον οποίο:

$$\epsilon_{gb}(T) = \frac{C}{T - T_c} \quad (3-23)$$

Όπου C η σταθερά Curie που ισούται με $1,2 \times 10^5$. Η πυκνότητα n_c εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το φράγμα δυναμικού:

$$n_c = \frac{N_s}{1 + \frac{N_c}{N_D} \exp\left(\frac{e(\phi_0 - E_0)}{KT}\right)} \quad (3-24)$$

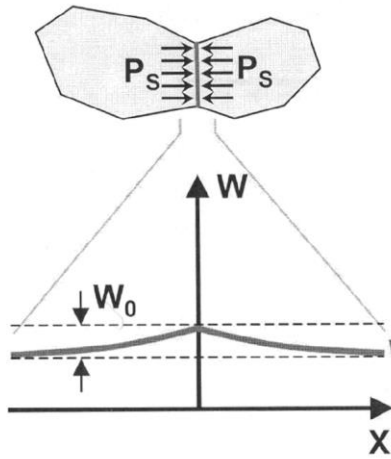
Όπου N_s είναι η πυκνότητα κοντά στην επιφάνεια, N_c ο αριθμός των ιόντων Ti στη μονάδα του όγκου και E_0 η ενέργεια ενεργοποίησης στις θέσεις κοντά στα όρια του κρυστάλλου.

Η ειδική αντίσταση ρ_c εξαρτάται επίσης και στην τάση που εφαρμόζεται. Το φράγμα δυναμικού είναι:

$$\phi = \phi_0 \left(1 - \frac{V}{4\phi_0}\right)^2 \quad (3-25)$$

όπου V είναι το δυναμικό στα όρια ενός κρυστάλλου.

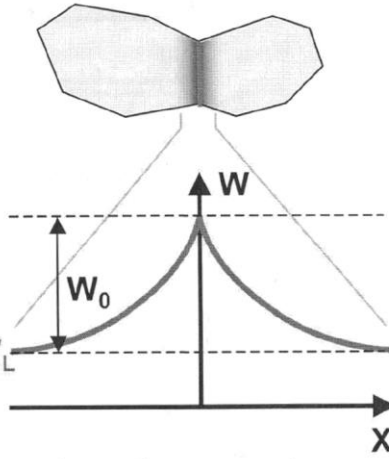
$T < T_C$: Σιδηροηλεκτρισμός
→ Αυθόρμητη πόλωση



Τα φορτία της πόλωσης
μειώνουν το φράγμα δυναμικού
στα όρια των κόκκων

→ W_0 μικρό

$T > T_C$: Απώλεια της
αυθόρμητης πόλωσης



Δεν υπάρχουν φορτία
πόλωσης, οπότε το φράγμα
δυναμικού στα όρια των
κόκκων μεγαλώνει

→ W_0 μεγάλο

Σχήμα 3.37 Το φράγμα δυναμικού στη σιδηροηλεκτρική και παραηλεκτρική κατάσταση.

Σύμφωνα με τον Jonker, το παραπάνω μοντέλο ισχύει για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $T_C + 10^\circ\text{C}$. Επειδή δεν υπάρχει μαθηματικό μοντέλο για την ειδική αντίσταση κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, η ειδική αντίσταση δίνεται από τον παρακάτω εμπειρικό νόμο:

$$\varepsilon_{gb}(T) = \frac{1}{(aT)^\gamma + \frac{1}{\varepsilon_{\max}}}, T \leq T_C + \Delta T_C \quad (3-26)$$

$$\frac{C}{T - T_C}, T \geq T_C + \Delta T_C$$

όπου $\varepsilon_{\max}$ είναι η μέγιστη τιμή της $\varepsilon_{gb}(T)$ και οι συντελεστές α και γ δίνονται από τις σχέσεις:

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{\max}(T_C + \Delta T_C)}{\varepsilon_{\max}\Delta T_C - C} \quad (3-27)$$

$$\alpha^\gamma = \frac{\varepsilon_{\max}\Delta T_C - C}{\varepsilon_{\max}C(T_C + \Delta T_C)^\gamma} \quad (3-28)$$

Η συνολική ειδική αντίσταση ενός PTC thermistor είναι το άθροισμα της ειδικής αντίστασης στους κόκκους και της ειδικής αντίστασης στα όρια των κόκκων.

Η κατασκευή ενός thermistor και η διαμόρφωσή του σε συγκεκριμένο σχήμα και διαστάσεις είναι δυνατόν να γίνει με μία από τις παρακάτω τεχνικές:

- Τήξη των συστατικών και κατόπιν στερεοποίηση αυτών.
- Με τεχνικές εξάχνωσης καθώς και τεχνικές δημιουργίας λεπτών υμενίων.
- Θέρμανση των συμπιεσμένων σκονών σε μία θερμοκρασία όπου συσσωματώνονται σε μία συμπαγή μάζα.

Για thermistors με οξειδία η τελευταία τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως. Με την τεχνική αυτή γίνεται εύκολο να αναμιχθούν δύο ή παραπάνω οξειδία σε διάφορες ποσότητες και να δημιουργήσουν ένα ομοιόμορφο και ομογενές στερεό. Η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται κυρίως από τις ποσότητες των συστατικών, η τελευταία ελέγχεται προσεχτικά με τη χημική ανάλυση των μειγμάτων. Η αντίσταση μπορεί επίσης να εξαρτάται, σε πολύ μικρότερο βαθμό, από τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η έψηση του υλικού που είναι μεταξύ 1000 και 1350°C.

Συνήθως οι thermistors διαμορφώνονται σε 4 βασικά σχήματα: σφαίρα, δίσκο, ράβδο και υμένια. Σε κάθε περίπτωση τα οξειδία αναμιγνύονται και διαμορφώνουν ένα ομογενές και λεπτόκοκκο μίγμα σε ένα σφαιρόμυλο ή παρόμοια συσκευή. Στη συνέχεια γίνεται η συμπίεση της σκόνης στο επιθυμητό σχήμα και η έψησή του σε μια θερμοκρασία ικανή να γίνει η πυροσυσσωμάτωση του υλικού.

3.4.4 Αισθητήρες Πεδίου

Οι αισθητήρες πεδίου κατέχουν ίσως το μεγαλύτερο κομμάτι στην παγκόσμια αγορά των μαγνητικών αισθητήρων. Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες πεδίου είναι εκείνοι που χρησιμοποιούνται για μικρές διακυμάνσεις πεδίου ή ακόμη για ανίχνευση κάποιας μαγνητικής ανωμαλίας (MAD). Τα φαινόμενα της μαγνητο-αντίστασης και της μαγνητο-εμπέδησης, καθώς και επαγωγικές τεχνικές, όπως οι fluxgates, είναι από τις σημαντικότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη αισθητήρων πεδίου με μαγνητικά υλικά. Σε ειδικές εφαρμογές τέτοιων αισθητήρων έχει χρησιμοποιηθεί και το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Οι πιο αξιόπιστοι αισθητήρες για μετρήσεις χαμηλού πεδίου είναι οι επαγωγικές διατάξεις με μαγνητικά υλικά. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν ευαισθησία και αβεβαιότητα της τάξης του 0.1pT και 1pT, αντίστοιχα.

Οι αισθητήρες πεδίου τύπου μαγνητο-αντίστασης –με μορφή πολυστρωματικών υμενίων- χαρακτηρίζονται από την κάθετη μαγνητική ανισοτροπία των φερρομαγνητικών στρωμάτων. Οι αισθητήρες αυτοί κατασκευάζονται σε μαζική παραγωγή με χρήση τεχνικών παρασκευής λεπτών υμενίων επιτρέποντας έτσι χαμηλό κόστος παραγωγής, συγκεκριμένα της τάξης των 10-100 Euro/αισθητήρα. Η ευαισθησία και η αβεβαιότητά τους κυμαίνονται σε σαφώς καλύτερα επίπεδα απ' ό,τι στους αισθητήρες τύπου Hall- ως ενδεικτικές τιμές αναφέρονται οι 1nT και 10nT, αντίστοιχα. Το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης, σε άμορφα και νανοκρυσταλλικά σύρματα επιτρέπει πολύ καλύτερα επίπεδα ευαισθησίας και αβεβαιότητας, της τάξης των 1-10pT και 100pT, αντίστοιχα. Το κόστος μιας τέτοιας συσκευής κυμαίνεται στα 100-300Euro/αισθητήρα. Όμως παρά το γεγονός ότι το κόστος αυτών των συσκευών είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με τους αισθητήρες μαγνητο-αντίστασης, τα πολύ καλά χαρακτηριστικά τους, επιτρέπουν τη χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές αυτοματισμού. Και το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη αισθητήρων πεδίου για μη καταστρεπτικό έλεγχο μαγνητικών επιφανειών. Όσον αφορά την απόδοση κύριοι ανταγωνιστές όλων αυτών των αισθητήρων που βασίζονται σε μαγνητικά φαινόμενα και υλικά παραμένουν τα μαγνητόμετρα SQUID. Οι αισθητήρες αυτοί παρουσιάζουν ευαισθησία της τάξης του 1fT.

3.4.5 Αισθητήρες εγγραφής και ανάγνωσης πληροφορίας

Η κατηγορία των αισθητήρων εγγραφής και ανάγνωσης πληροφορίας διαιρείται σε δύο υποκατηγορίες: τα καταγραφικά μέσα και τους αισθητήρες ασφάλειας. Στα καταγραφικά μέσα συμπεριλαμβάνονται οι επιφάνειες εγγραφής και οι κεφαλές ανάγνωσης. Οι μαγνητικές κεφαλές ανάγνωσης αφορούν κυρίως αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητο-αντίστασης (giant MR).

Οι αισθητήρες ασφάλειας σχετίζονται με τη δημιουργία ενός κώδικα που να βασίζεται σε μια σειρά μαγνητικών σημάτων. Τα σήματα αυτά επιτρέπουν την αναγνώριση ενός αντικειμένου χωρίς να υπάρχει άμεση οπτική παρατήρηση. Αυτού του είδους οι αισθητήρες, δύναται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου για πρακτικούς λόγους, είναι αδύνατη η οπτική κωδικοποίηση (optical bar coding).

3.4.6 Πολυπαραμετρικοί αισθητήρες (multi-purpose sensors)

Αυτοί οι αισθητήρες, προσδιορίζουν την ομάδα των αποκαλούμενων «έξυπνων» αισθητήρων στην οποία συμπεριλαμβάνονται δύο υποκατηγορίες. Πρόκειται για τους πολυπαραμετρικούς και τους αυτοδιορθούμενους αισθητήρες. Οι αισθητήρες πολλαπλών παραμέτρων (multi-parameter) είναι ικανοί να ανιχνεύουν περισσότερα από ένα φυσικά μεγέθη. Παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα είναι μια μαγνητο-ελαστική διάταξη που να ανιχνεύει πεδίο και τάση ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο μπορεί συμβαίνει επειδή η παλμική έξοδος του αισθητήρα είναι ρυθμισμένη σε εύρος εξαιτίας του περιβάλλοντος πεδίου ενώ το πλάτος παλμού ρυθμίζεται μόνο από τις εφελκυστικές τάσεις. Οι αυτοδιορθούμενοι (reacting) αισθητήρες, είναι ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα, που «αισθάνονται» και αντιδρούν ανάλογα με τη μέτρηση. Για παράδειγμα ένας αισθητήρας οδήγησης πυραύλου, περιλαμβάνει έναν ακριβή αισθητήρα πεδίου για πλοήγηση ο οποίος μετρά τη διεύθυνση της κίνησης του πυραύλου και ένα σύστημα αντίδρασης, το οποίο αλλάζει τη διεύθυνση του πυραύλου ανάλογα με μια προεπιλεγμένη εντολή.

3.5 Εφαρμογές Αισθητήρων

Παρακάτω επιχειρείται μια περιληπτική παρουσίαση των κυριοτέρων εφαρμογών των αισθητήρων.

3.5.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Το βασικό πεδίο των βιομηχανικών εφαρμογών αναφέρεται στη διεξαγωγή μη καταστρεπτικών δοκιμών και τους σχετικούς υπολογισμούς. Σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αισθητήρες ανίχνευσης μικρής έντασης πεδίου- με περισσότερο χρησιμοποιούμενους τους αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall. Οι αισθητήρες Hall έχουν ευαισθησία της τάξης του 0.1mT, εκείνοι που βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητο-αντίστασης (MR) 1μT ενώ σε διατάξεις τύπου μαγνητο-εμπέδησης η ευαισθησία κυμαίνεται στα 10-100pT. (Στην ορολογία των αισθητήρων η τιμή της ευαισθησίας, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύει μικρές διακυμάνσεις μετρούμενου μεγέθους). Έχουν επίσης προταθεί και αισθητήρια στοιχεία τύπου MDL που πραγματοποιούν ικανοποιητικές μετρήσεις.

Το δεύτερο πιο σημαντικό πεδίο βιομηχανικών εφαρμογών είναι εκείνο των ελεγκτών θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης/δόννησης. Πρόκειται στην πλειοψηφία τους για διακόπτες θέσης που στηρίζονται στο φαινόμενο της γιγάντιας μαγνητο-αντίστασης ("giant" MR) και

έχουν επαναληψιμότητα καλύτερη από 10^{12} , με κόστος περίπου 1Euro/αισθητήρα. Ανάλογα με την απαιτούμενη ευαισθησία χρησιμοποιούνται και κατάλληλα είδη αισθητήρων θέσης. Λόγου χάρη, όταν απαιτείται καλή ευαισθησία, της τάξης του $1\mu\text{m}$, χρησιμοποιούνται διαφορικοί αισθητήρες θέσης τύπου μαγνητικής ταινίας με μόνιμους μαγνήτες. Το κόστος τους κυμαίνεται στο 1kEuro/αισθητήρα. Γενικά η τεχνική του MDL –με κόστος περίπου 0.1kEuro/αισθητήρα- προτιμάται όταν η επιθυμητή ευαισθησία είναι της τάξης των 1-10 μm .

Όσον αφορά τους αισθητήρες μάζας όπως οι κυψελίδες φορτίου, οι μετρητές ροπής στρέψης και οι μετρητές πίεσης (pressure gauges), στις βιομηχανικές τους εφαρμογές βασίζονται σε αγώγιμα ή ημιαγώγιμα υλικά. Οι μετρητές μηχανικής τάσης (strain gauges), είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για μετρήσεις φορτίου.

Κάποιες νέες τεχνικές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης και την τεχνική της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης έδωσαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα όσον αφορά την ευαισθησία των μετρητών φορτίου και παράγωγων μεγεθών. Στην περίπτωση αυτών των τεχνικών αν και η ευαισθησία που έχουν οι διατάξεις αυτές είναι καλύτερη από εκείνη των μετρητών μηχανικής τάσης το βασικό πρόβλημα παραμένει η μικρή διάρκεια ζωής τους, η οποία είναι περίπου 10^8 ενώ εκείνη των μετρητών μηχανικής τάσης είναι περίπου 10^{12} .

3.5.2 Βιοϊατρικοί Αισθητήρες

Οι πιο γνωστοί μαγνητικοί αισθητήρες, σ' αυτό το πεδίο εφαρμογών είναι οι εγκεφαλογράφοι. Πρόκειται για διατάξεις αισθητήρων ανίχνευσης πεδίου της τάξης του 0.1-1 μT . Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενες διατάξεις για τέτοιες εφαρμογές είναι τα μαγνητόμετρα SQUID, ευαισθησίας 1-10fT και κόστους 1MEuro/αισθητήρα. Σε τέτοιες εφαρμογές έχει χρησιμοποιηθεί και το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν κόστος περίπου 10kEuro/αισθητήρα, αλλά και το μειονέκτημα της χαμηλής ευαισθησίας (τάξης 10-100pT), γεγονός που δεν τους καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικούς.

Εκτός από τον εγκεφαλογράφο ένα άλλο είδος μαγνητικού αισθητήρα είναι ο νέος τύπος καρδιογράφου ο οποίος είναι απλούστερος στη λειτουργία και πιο φθηνός από τους κλασικούς ηλεκτροκαρδιογράφους. Βέβαια οι ηλεκτροκαρδιογράφοι πραγματοποιούν μετρήσεις που δεν είναι δυνατό να ληφθούν από το νέο μοντέλο το οποίο συνίσταται από διατάξεις τύπου μαγνητο-εμπέδησης, με κόστος περίπου 1kEuro/αισθητήρα.

Τα τελευταία χρόνια και εξαιτίας του μεγάλου ενδιαφέροντος για τον προσδιορισμό του DNA, αναπτύχθηκαν αισθητήρες πεδίου, που παρουσιάζουν χωρική διακριτική ικανότητα (resolution) της τάξης του 1mm και κόστος 100 Euro/αισθητήρα. Οι διατάξεις αυτές κυρίως βασίζονται στο φαινόμενο της μεγάλης μαγνητο-αντίστασης αν και τελευταία για την ίδια εφαρμογή, γίνονται δοκιμές με αισθητήρες τύπου μαγνητο-εμπέδησης.

3.5.3 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Από τις σπουδαιότερες εφαρμογές των αισθητήρων αυτής της κατηγορίας είναι τα συστήματα εντοπισμού ναρκών (anti-mining control system). Μέχρι στιγμής οι αισθητήρες για τέτοια συστήματα βασίζονται σε συσκευές ανίχνευσης μικρών πεδίων ή μαγνητικής ανωμαλίας. Φυσικά, όσο πιο πολύ εξελίσσονται τα μοντέλα των ναρκών, τόσο λιγότερο σίδηρο περιέχουν και συνεπώς τόσο πιο ευαίσθητοί και ακριβείς αισθητήρες πεδίου απαιτούνται για τον εντοπισμό τους. Για το σκοπό αυτό έχουν ήδη δοκιμαστεί πολλά είδη αισθητήρων, από επαγωγικές διατάξεις ως αισθητήρες τύπου μαγνητο-αντίστασης και μαγνητο-εμπέδησης. Η ευαισθησία των τωρινών αισθητήρων κυμαίνεται από 10-100pT. Μια εφαρμογή που χρησιμοποιείται και για οικιακές χρήσεις είναι τα συστήματα μαγνητικής ταυτοποίησης (magnetic signature). Σύμφωνα με τα συστήματα αυτά, τα στρατιωτικά, και όχι μόνο, οχήματα

είναι εξοπλισμένα με πηνία που εφοδιάζονται με ρεύμα συγκεκριμένης -συνήθως και κωδικοποιημένης- κυματομορφής. Η ανίχνευση του πεδίου που παράγεται από τέτοιο ρεύμα οδηγεί σε αναγνώριση του συγκεκριμένου τύπου οχήματος. Από τα πιο εξελιγμένα συστήματα πλοήγησης πυραύλων είναι αυτά που βασίζονται σε γυροσκόπια ελέγχου αδρανούς μάζας ή σε παγκόσμια συστήματα συντεταγμένων (GPS). Παράλληλα έχει αρχίσει η προσπάθεια για ανάπτυξη και χρησιμοποίηση αισθητήρων πεδίου. Η αρχή λειτουργίας αισθητήρων τύπου μαγνητο-αντίστασης και τύπου μαγνητο-εμπέδησης που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό βασίζεται στη μέτρηση της διακύμανσης του πεδίου και τις απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις, εξαιτίας του γήινου πεδίου.

3.5.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, η προστασία του περιβάλλοντος αναδεικνύεται σε θέμα ζωτικής σημασίας. Αυτό που δύναται να προσφέρει η επιστήμη των αισθητήρων προς αυτή την κατεύθυνση είναι η μέτρηση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την περιβαλλοντική κατάσταση. Μείζονος σημασίας ζήτημα είναι η ανίχνευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ανίχνευση αυτή πραγματοποιείται με χρήση αισθητήρων πεδίου. Το εύρος των μετρήσεων εκτείνεται από συνεχή πεδία μέχρι εναλλασσόμενα πεδία συχνότητας 30GHz. Η ευαισθησία των μετρήσεων που λαμβάνονται, κυμαίνεται από μερικά pT ως μερικά mT και οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν κυριολεκτικά κατακτήσει το συγκεκριμένο τομέα (επαγωγικές διατάξεις και αισθητήρες πεδίου τύπου μαγνητο-εμπέδησης). Τέλος γίνεται χρήση αισθητήρων και σε εφαρμογές που σχετίζονται με την απαρίθμηση των εν κινήσει οχημάτων σε κατοικημένες περιοχές με στόχο την ανάπτυξη διορθωτικών ενεργειών στην κυκλοφοριακή σηματοδότηση.

3.5.5 Εφαρμογές στον Αυτοματισμό

Στα καινούρια οχήματα υπάρχει η τάση για χρησιμοποίηση όλο και περισσότερων αισθητήρων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα αυτοκίνητα που παράγονται σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότεροι από 1500 αισθητήρες. Οι μαγνητικοί αισθητήρες κυριαρχούν σε πολλές αισθητήριες εφαρμογές αυτού του χώρου, με σημαντικότερο και πιο γνωστό τον γωνιακό μαγνητικό αισθητήρα θέσης που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του συστήματος ABS στα φρένα των αυτοκινήτων. Ο τρόπος λειτουργίας του έχει σχέση με την περιστροφή ενός δακτυλίου που φέρει οδόντες από μόνιμο μαγνήτη κατά την κίνηση του τροχού. Οποιαδήποτε ξαφνική και αναπάντεχη εμπλοκή των τροχών κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος ενεργοποιεί το σύστημα anti-block (ABS) ανακουφίζοντας έτσι για απειροστά του δευτερολέπτου την πίεση από το φρενάρισμα.

Άλλη μια εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων στα οχήματα, είναι οι αισθητήρες ροπής στρέψης οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο πηδάλιο διεύθυνσης του τροχού και στην παρακολούθηση της λειτουργίας της ατράκτου. Αν και βρίσκονται σε στάδιο εργαστηριακής ανάπτυξης αναμένεται ότι πολύ σύντομα, θα ξεκινήσει η βιομηχανική παραγωγή τους. Επιπλέον δοκιμαστικά έχουν χρησιμοποιηθεί αισθητήρες, προκειμένου να διευκολύνουν τη διαδικασία οδήγησης, είτε μέσω της ενημέρωσης που παρέχουν στον οδηγό σχετικά με την κατάσταση της πορείας του αυτοκινήτου ή ακόμη και μέσω της αντίδρασης που προβάλλουν σε μια λανθασμένη απόφαση του οδηγού.

3.5.6 Εργαστηριακοί Αισθητήρες

Όσον αφορά τον τομέα των εργαστηριακών αισθητήρων, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε ό,τι αφορά την επιστήμη της μετρολογίας. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι αυτή που σχετίζεται με τον προσδιορισμό των δευτερευόντων προτύπων βαθμονόμησης πεδίου (secondary standards), διαδικασία που βασίζεται σε ακριβείς αισθητήρες πεδίου. Και σε αυτή την εφαρμογή κυριαρχούν οι επαγωγικές διατάξεις.

Μια άλλη εφαρμογή είναι ο χαρακτηρισμός δομής και ο μαγνητικός χαρακτηρισμός με τα μικροσκόπια ατομικής δύναμης (AFM), μαγνητικής δύναμης (MFM) και το μικροσκόπιο διέλευσης - σάρωσης (STM). Με τέτοια μικροσκόπια, προσδιορίζεται λεπτομερώς η τοπογραφία μιας επίπεδης επιφάνειας. Στα προαναφερόμενα μικροσκόπια, μια ακίδα που δονείται στην κορυφή της επιφάνειας, δημιουργεί δυνάμεις (Van der Waals για το AFM, μαγνητικές δυνάμεις για το MFM και ηλεκτρικές δυνάμεις για το STM) ανάλογα με την τοπογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας.

3.6 Ανάπτυξη ενός Αισθητήρα

Η δημιουργία ενός αισθητήρα αποτελεί από μόνη της μια επιστήμη όπου συνδυάζονται γνώσεις από την επιστήμη των υλικών, την ηλεκτρονική και τη μετρολογία. Στην ενότητα αυτή θα γίνει παρουσίαση μιας σχετικά γενικευμένης διαδικασίας που μπορεί να ακολουθηθεί για την ανάπτυξη ενός αισθητήρα. Δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη και τις βασικές αρχές των μαγνητικών αισθητήρων.

3.6.1 Καθορισμός του υπό μέτρηση Φυσικού Μεγέθους

Καταρχήν πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός του προβλήματος και συνεπώς του φυσικού μεγέθους που θα μετρηθεί. Το υπό μέτρηση μέγεθος μπορεί να είναι θέση, μάζα, πεδίο, χρόνος, ηλεκτρικά μεγέθη, θερμοκρασία καθώς και παράγωγά τους μεγέθη.

Μόλις ολοκληρωθεί το στάδιο αυτό λαμβάνει χώρα ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των φυσικών ιδιοτήτων που θα μετρηθούν κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο και στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αισθητήρα. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις ιδιότητες είναι το εύρος λειτουργίας, η ευαισθησία, η αβεβαιότητα και η εξάρτηση της απόκρισης του αισθητήρα από παραμετρικά φαινόμενα.

Η ευαισθησία είναι ο λόγος της εξόδου προς την είσοδο του αισθητήρα. Η ευαισθησία δείχνει πόσο εύκολα ένας αισθητήρας μπορεί να μετρήσει ένα φυσικό μέγεθος.

Η αβεβαιότητα ενός αισθητήρα είναι η απόκλιση της μέτρησης από την πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους, τη στιγμή της μέτρησης. Το σφάλμα που προσδιορίζεται από την τιμή της αβεβαιότητας περιλαμβάνει το σφάλμα που εκτιμάται μέσω της ακρίβειας του αισθητήρα αλλά και το σφάλμα από την επίδραση παραμετρικών φαινομένων. Η αβεβαιότητα ενός μαγνητικού αισθητήρα, αφορά κυρίως την υστέρηση που προκαλείται από τη μαγνητική απόκριση του χρησιμοποιούμενου υλικού.

Η απόκριση μιας συσκευής ισούται με το χρόνο που απαιτείται για να ληφθεί η τελική τιμή εξόδου της συσκευής για μια συγκεκριμένη είσοδο. Η απόκριση ενός μαγνητικού αισθητήρα εξαρτάται από το περιβάλλον πεδίο, τη θερμοκρασία, την υγρασία καθώς και το χρόνο.

Το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα, ισούται με τα όρια εντός των οποίων η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα, δηλαδή η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή που είναι ικανός να μετρά. Στις προδιαγραφές των αισθητήρων αναφέρονται επίσης, το θερμοκρασιακό εύρος καθώς και το εύρος τιμών υγρασίας.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του αισθητήρα που αναγράφεται στις προδιαγραφές του είναι η διακριτότητα, η οποία αναφέρεται στο μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί και να μετρηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτότητα μιας αισθητήριας συσκευής τόσο μικρότερη υποδιαίρεση του μεγέθους μπορεί αυτή να μετρήσει.

3.6.2 Επιλογή της Αρχής Λειτουργίας

Όταν πλέον έχουν προσδιοριστεί τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του υπό ανάπτυξη αισθητήρα, σειρά έχει ο καθορισμός των κριτηρίων που αφορούν την επιλογή του μαγνητικού φαινομένου και του υλικού που θα χρησιμοποιηθούν. Οι πιο σημαντικές παράμετροι για την επιλογή του μαγνητικού φαινομένου και του υλικού που θα χρησιμοποιηθούν σε αισθητήριες εφαρμογές είναι ο βαθμός εξάρτησης από την ευαισθησία, την αβεβαιότητα, το περιβάλλον πεδίο, τη θερμοκρασία και την υγρασία.

Στη συνέχεια συντάσσεται ένας πίνακας ο οποίος περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του κάθε φαινομένου και τις απαιτούμενες ιδιότητες έτσι ώστε να επιλεγεί το φαινόμενο εκείνο που ικανοποιεί περισσότερο τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Η επιλογή ενός μαγνητικού φαινομένου ανάμεσα σε φαινόμενα αγωγών, ημιαγωγών, υπεραγωγών, οπτικοηλεκτρονικής κ.λ.π, χωρίς αυτό να είναι περισσότερο θεμιτό από τα προαναφερόμενα φαινόμενα, μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία του όλου σχεδιασμού.

3.6.3 Προσαρμογή και Χαρακτηρισμός του Υλικού

Εφόσον επιλεγεί κάποιο μαγνητικό φαινόμενο για την ανάπτυξη του αισθητήρα, απαραίτητος είναι τόσο ο χαρακτηρισμός της αισθητήριας συσκευής όσο και η κατάλληλη προσαρμογή του μαγνητικού υλικού.

3.6.3.1 Τεχνικές Παρασκευής Υλικού

Η ανάπτυξη της συσκευής περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την κατασκευή του μαγνητικού υλικού. Οι κύριες τεχνικές παρασκευής είναι τρεις:

- τεχνικές παρασκευής λεπτών υμενίων,
- τεχνικές παρασκευής παχιών υμενίων και
- τεχνικές παρασκευής ταχέως ψυχόμενων μεταλλικών ινών (rapid quenching techniques)

Τεχνικές παρασκευής λεπτών υμενίων

Ο τρόπος σχηματισμού στερεών στρωμάτων πάνω σε συγκεκριμένες επιφάνειες, είναι η τεχνική σύνθεσης υλικών από συστατικά που βρίσκονται σε αέρια κατάσταση. Η διαδικασία αυτή γίνεται είτε με χημική αντίδραση των στοιχείων που αποτίθενται (χημική απόθεση ατμών – CVD) είτε με απλή (φυσική) απόθεση ατμών (PVD). Η χημική απόθεση ατμών λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα υπό υψηλές θερμοκρασίες. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης χημικών ατμών είναι η πυρόλυση, η αναγωγή, η οξείδωση και η νιτρίδωση.

Οι πιο γνωστές τεχνικές φυσικής εναπόθεσης ατμών είναι η τεχνική της εξάχνωσης υλικών και αυτή του θρυμματισμού του υλικού που πρόκειται να εναποτεθεί. Και οι δύο τεχνικές πραγματοποιούνται σε συνθήκες κενού.

Πιο κλασική τεχνική, είναι αυτή που πραγματοποιείται με εξάχνωση ενός θερμαινόμενου υλικού. Το υλικό αυτό θερμαίνεται σε συνθήκες κενού, εξάχνωνεται και διασπείρεται σε όλο το χώρο άρα και στην προεπιλεγμένη επιφάνεια εναπόθεσης του υλικού.

Η εξάχνωση γίνεται είτε με ωμική θέρμανση είτε με δέσμη ηλεκτρονίων (ηλεκτρονικό πυροβόλο).

Η τεχνική της εξάχνωσης με θρυμματισμό βασίζεται στην απομάκρυνση επιφανειακών ατόμων ή μορίων από την επιφάνεια ενός υλικού -μέσω βομβαρδισμού με ενεργοποιημένα ιόντα- τα οποία στη συνέχεια προσκρούουν υπό ελεγχόμενες συνθήκες με το υπόστρωμα εναπόθεσης.

Τεχνικές παρασκευής παχίων υμενίων

Με την τεχνική αυτή ένα υδατικό ή μη διάλυμα, ελεγχόμενης σύστασης, απλώνεται με σπάτουλα στις επιφάνειες εναπόθεσης και κατά τη θερμική επεξεργασία πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις εκείνες που δίνουν υμένα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών.

Τεχνικές παρασκευής ταχέως ψυχόμενων ινών

Η κύρια εφαρμογή των τεχνικών παρασκευής ταχέως ψυχόμενων μεταλλικών ινών (rapid quenching techniques), αφορά την παρασκευή άμορφων μαγνητικών υλικών. Τα άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά (ταινίες και σύρματα), είναι είτε συμβατικά ή με επικάλυψη γυαλιού (glass-covered amorphous wires).

Η τεχνική παρασκευής των άμορφων ταινιών και ινών βασίζεται στην ταχεία απόψυξη του τηγμένου μητρικού κράματος, το οποίο προσκρούει είτε σε περιστρεφόμενο τύμπανο χαλκού (δημιουργία ταινιών) είτε σε υδάτινο κύλινδρο (δημιουργία ινών). Η ταχεία απόψυξη της τάξης των 10^6 K/sec- προσδίδει την άμορφη δομή των ταινιών και των ινών.

Η πρόσφατα αναπτυχθείσα τεχνική Taylor, αφορά την παρασκευή συρμάτων με επικάλυψη γυαλιού. Μία μήτρα από άμορφο πυρίτιο, γύρω από την οποία βρίσκεται πηνίο που διαρέεται από ρεύμα, φέρει στο εσωτερικό της το κράμα. Όταν το άμορφο πυρίτιο περιέλθει σε παχύρρευστη κατάσταση τότε εκχυόμενο ταυτόχρονα με το τηγμένο κράμα ξεκινά η μορφοποίηση μεγάλου μήκους συρμάτων στην επιφάνεια των οποίων υπάρχει επίστρωση γυαλιού (glass-covered wires). Τα σύρματα που λαμβάνονται με την τεχνική αυτή έχουν εσωτερική και εξωτερική διάμετρο της τάξης των 10μm και 20μm, αντίστοιχα.

3.6.3.2 Χαρακτηρισμός του αισθητήρα

Όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της διάταξης, η διαδικασία περιλαμβάνει χαρακτηρισμό δομής, μαγνητικό χαρακτηρισμό και βαθμονόμηση του αισθητήριου στοιχείου.

Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός έχει σχέση με τον προσδιορισμό των καμπυλών B-H και λ-H, σε ένα ή και περισσότερους άξονες ανισοτροπίας του υλικού.

Ο χαρακτηρισμός της δομής αφορά τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας του υλικού του αισθητήρα με χρήση μικροσκοπίων σάρωσης, όπως SEM, TEM, με μικροσκόπια ατομικής, μαγνητικής δύναμης και διέλευσης-σάρωσης (AFM, MFM, STM, αντίστοιχα), με περίθλαση ακτινών X, καθώς και με διαφορική, θερμική ανάλυση (DTA).

3.6.3.3 Προσαρμογή των ιδιοτήτων του υλικού

Τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού της συσκευής, υποδεικνύουν και τη διαδικασία προσαρμογής του υλικού, που θα ακολουθηθεί.

Ανόπτηση

Από τις πιο σημαντικές διαδικασίες προσαρμογής είναι η ανόπτηση, μέσω της οποίας ελέγχεται η μικροδομή του μαγνητικού υλικού. Η ανόπτηση πραγματοποιείται με θερμική κατεργασία και ταυτόχρονα με παραμετρικό έλεγχο του πεδίου, της μηχανικής τάσης και του ρεύματος που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα παρακάτω είδη ανόπτησης:

- Θερμική ανόπτηση.
- Θερμική ανόπτηση με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου.
- Εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος σε ατμόσφαιρα αργού (flash current annealing).
- Εφαρμογή ρεύματος και μηχανικής καταπόνησης ταυτόχρονα (stress-current annealing).
- Θερμική κατεργασία με ταυτόχρονη εφελκυστική καταπόνηση (creep induced anisotropy).

Εισαγωγή προσμείξεων

Μια άλλη διαδικασία προσαρμογής είναι η νόθευση του μαγνητικού υλικού με στόχο τη σκλήρυνσή του μέσω αγκύρωσης των μαγνητικών διπόλων σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς. Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία νόθευσης του μαγνητικού υλικού είναι η διάχυση και η ιοντική εμφύτευση.

Η διαδικασία εναπόθεσης των προσμείξεων πραγματοποιείται τοποθετώντας το υλικό σε φούρνο όπου υπάρχει συνεχής ροή αδρανούς αερίου ενώ η πηγή των προσμείξεων μπορεί να είναι σε αέρια, υγρή ή σε στερεή φάση.

Η βασική αρχή της τεχνικής της ιοντικής εμφύτευσης είναι η πρόσκρουση κατάλληλων ιόντων με ενέργειες 3-400keV, πάνω στην επιφάνεια του υπό νόθευση υλικού. Ανάλογα με την ενέργειά τους τα προαναφερθέντα ιόντα εισάγονται σε βάθη από 100-10000 Å περίπου κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Τελικά τα ιόντα που εισέρχονται στο υλικό σκεδάζονται με τα άτομα και τα ηλεκτρόνια του υλικού, με αποτέλεσμα τη συνεχή επιβράδυνσή τους ως την ακινητοποίησή τους.

Τέλος πραγματοποιούνται διαδικασίες βαθμονόμησης του αισθητήρα με χρήση πρωτευόντων (primary), δευτερευόντων (secondary) και εργασιακών προτύπων (working standards). Τα τελευταία σχετίζονται με τη χρήση αισθητήριων οργάνων. Το απαιτούμενο επίπεδο αβεβαιότητας σε κάθε εφαρμογή είναι αυτό που καθορίζει ποια τεχνική βαθμονόμησης θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά.

3.6.3.4 Το Ηλεκτρονικό Μέρος του Αισθητήρα

Μετά την ανάπτυξη του αισθητήριου στοιχείου που ολοκληρώνεται με τη διαδικασία χαρακτηρισμού και προσαρμογής του υλικού, ακολουθεί η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού μέρους του αισθητήρα. Το ηλεκτρονικό μέρος αναφέρεται στη δημιουργία του κυκλώματος διέγερσης, του κυκλώματος ρύθμισης του σήματος εξόδου και του κυκλώματος αυτοβαθμονόμησης.

Το κύκλωμα διέγερσης είναι είτε συνεχές είτε ημιτονοειδές, τριγωνικό ή παλμικό ρεύμα που εφαρμόζεται ωμικά ή επαγωγικά στο αισθητήριο μέσο. Η κατανάλωση ενέργειας αυτού του κυκλώματος κυμαίνεται από 1nW ως 1mW. Στον σχεδιασμό τέτοιων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως ενισχυτές MOSFET και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τα κυκλώματα ρύθμισης σήματος και αυτοβαθμονόμησης είναι συνήθως ενισχυτές που φέρουν μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και μικροϋπολογιστές για την εκπόνηση λογισμικών διαδικασιών.

3.6.3.5 Έλεγχος Παραμετρικών Φαινομένων

Μετά και την ολοκλήρωση του ηλεκτρονικού μέρους, σειρά έχουν οι εργασίες που αφορούν τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμετρικών φαινομένων στον αισθητήρα. Κυριότερα είναι το περιβάλλον ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο χρόνος.

Η επίδραση του χρόνου στη συσκευή συνήθως αντιμετωπίζεται μέσω διαδικασίας γήρανσης. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με χρήση ενός συνδυασμού οξειδωτικής και χημικής προσβολής του υλικού.

Το ζήτημα της εξάρτησης από τη θερμοκρασία επιλύεται μέσω της σταθεροποίησης της απόκρισης που απαιτείται μέσα σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια. Τα όρια αυτά (κατώτερο και ανώτερο) θεωρούνται ως το χαμηλότερο και υψηλότερο όριο της θερμικής συμπεριφοράς του αισθητήρα.

Η παρεμβολή του περιβάλλοντος ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι ίσως το πιο σοβαρό πρόβλημα στους μαγνητικούς αισθητήρες. Βέβαια αν πρόκειται για αισθητήρα πεδίου δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα εφόσον το περιβάλλον πεδίο είναι το μέγεθος που μετράται. Σε διαφορετική όμως περίπτωση υπάρχουν δύο λύσεις: η μία αφορά την κλασική μαγνητική θωράκιση, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση και η άλλη είναι η ακύρωση του περιβάλλοντος πεδίου με χρήση διατάξεων σε σειρά και αντίθετα έτσι ώστε να τα επαγόμενα μαγνητικά πεδία να αναιρούνται μεταξύ τους.

Η προστασία του αισθητήρα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχή, υγρασία, υψηλή θερμοκρασία) επιτυγχάνεται με το πακετάρισμα (housing) του αισθητήρα. Αυτό κυρίως αναφέρεται στους αριθμούς IP (βαθμοί υδατοστεγανότητας) της συσκευής.

Τέλος ο αισθητήρας βαθμονομείται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα και πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των διορθωτικών κινήσεων. Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου είναι έτοιμος τόσο ο αισθητήρας όσο και ο φάκελος με τα τεχνικά χαρακτηριστικά (technical envelope).

Μέρος 3^ο: Εισαγωγή στις Μεθόδους Ηλεκτρονικών Μη Καταστροφικών Δοκιμών

Ο όρος «μη καταστροφική αξιολόγηση» (Non-Destructive Evaluation - NDE) περιλαμβάνει πολλές επιμέρους έννοιες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν διάφορες δραστηριότητες του εν λόγω πεδίου. Κάποιες απ' αυτές τις έννοιες είναι:

- Μη καταστροφικές δοκιμές (nondestructive testing, NDT).
- Μη καταστροφική επιθεώρηση (nondestructive inspection, NDI).
- Μη καταστροφική εξέταση (nondestructive examination, NDEx).

Όλοι αυτοί οι όροι είναι παρόμοιοι, εφόσον περικλείουν μετρήσεις που διεξάγονται σ' ένα αντικείμενο ώστε να προσδιοριστεί κάποιο χαρακτηριστικό του ή να επαληθευτεί αν αυτό περιέχει ανωμαλίες, ασυνέχειες ή γενικότερα ελαττώματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον μη καταστροφικό έλεγχο επιτρέπουν στον επιθεωρητή να αποφασίσει αν το υπό εξέταση αντικείμενο πληροί τις προδιαγραφές, είναι δηλαδή αποδεκτό ή απορριπτό.

Η επιλογή μιας μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου ή συνδυασμού μεθόδων απαιτεί πρωτίστως την πλήρη κατανόηση του προβλήματος προς λύση. Στη συνέχεια εντοπίζονται εκείνες οι μέθοδοι που είναι κατάλληλες για περαιτέρω θεώρηση με βάση την τεχνική βιβλιογραφία. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να συγκριθούν οι επιλεχθείσες μέθοδοι, όχι όμως και ένας γενικός κανόνας, αφού τα αποτελέσματα των μεθόδων εξαρτώνται κάθε φορά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το πεδίο του «μη καταστροφικού ελέγχου» μπορεί κατά σύμβαση να διαιρεθεί σε 9 περιοχές:

- Ανίχνευση ατέλειας και αξιολόγηση.

- Ανίχνευση διαρροής και αξιολόγηση.
- Μέτρηση διαστάσεων και αξιολόγηση.
- Προσδιορισμός θέσης και αξιολόγηση.
- Χαρακτηρισμός δομής ή μικροδομής.
- Εκτίμηση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων.
- Προσδιορισμός τάσεων και δυναμικής απόκρισης.
- Ανάλυση «υπογραφής».
- Προσδιορισμός χημικής σύνθεσης.

3.8 Ανίχνευση ατέλειας και αξιολόγηση

Η ανίχνευση των ατελειών θεωρείται συνήθως από τις πιο σημαντικές πλευρές του μη καταστροφικού ελέγχου. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης του προβλήματος της ανίχνευσης των ατελειών σε ό,τι αφορά την επιλογή της μεθόδου. Ο σημαντικότερος τρόπος είναι να θεωρηθεί ότι υπάρχουν μόνο 6 παράγοντες που υπεισέρχονται σ' αυτήν τη διαδικασία, που είναι οι εξής:

- Ο λόγος που πραγματοποιείται ο έλεγχος.
- Ο τύπος των ατελειών που ενδιαφέρουν στο υλικό.
- Το μέγεθος και ο προσανατολισμός της ατέλειας που είναι απορριπτέα.
- Η προβλεπόμενη θέση της ατέλειας που ενδιαφέρει.
- Το μέγεθος και η μορφή του υπό εξέταση αντικειμένου.
- Τα χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να ελεγχθεί.

Οι λόγοι για τους οποίους χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια διαδικασία μη καταστροφικού ελέγχου μπορεί να είναι:

- Η ανάγκη να αποφασιστεί αν ένα αντικείμενο είναι αποδεκτό μετά από κάθε στάδιο παραγωγής (in-process NDE ή in-process inspection).
- Η ανάγκη να αποφασιστεί αν ένα αντικείμενο είναι αποδεκτό για τελική χρήση (final NDE ή final inspection).
- Η ανάγκη να αποφασιστεί αν ένα αντικείμενο που ήδη χρησιμοποιείται μπορεί να συνεχίσει στο μέλλον και για πόσο (in service NDE ή in service inspection).

Απαραίτητο επίσης είναι να συγκεκριμενοποιηθεί ποιοι τύποι ατελειών είναι οι ακατάλληλοι, το μέγεθος, ο προσανατολισμός τους καθώς και η θέση τους που θα μπορούσε να καταστήσει το υπό εξέταση αντικείμενο απορριπτέο. Οι περιορισμοί σ' αυτά τα χαρακτηριστικά υπαγορεύονται συνήθως από κάποιο κώδικα ή απαίτηση ή πρότυπο.

Οι ατέλειες, γενικά, μπορεί να είναι δύο ειδών, δισδιάστατες και τρισδιάστατες. Επίσης ανάλογα με τη θέση τους στο υλικό, διαχωρίζονται σε επιφανειακές και σε εσωτερικές. Στον **Πίνακα 3.3** αναφέρονται οι μέθοδοι με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να εντοπιστούν οι ατέλειες κάθε κατηγορίας. Δύο επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι το σχήμα και το μέγεθος του προς έλεγχο αντικειμένου. Ο **Πίνακας 3.4** συγκρίνει μεθόδους για διάφορα σχήματα. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου έχουν με τη σειρά τους ορισμένα χαρακτηριστικά ιδιαίτερης σημασίας τα οποία επιτρέπουν ή όχι τη χρησιμοποίησή τους σε συγκεκριμένα υλικά (**Πίνακας 3.5**). Επειδή κάθε μέθοδος έχει τη δική της συμπεριφορά και διαφορετικές ιδιότητες είναι επιθυμητό πολλές φορές να επιλέγονται παραπάνω της μίας μεθόδου, ώστε να υπάρχει

συμπληρωματική δυνατότητα εντοπισμού (π.χ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί η ραδιογραφία και οι υπέρηχοι για να εντοπιστούν οι επίπεδες (όπως οι ρωγμές) και οι τρισδιάστατες (όπως το πορώδες) ατέλειες.

ΜΕΘΟΔΟΙ	Επίπεδες ατέλειες	Τρισδιάστατες ατέλειες	Επιφανειακές ατέλειες	Εσωτερικές ατέλειες
Οπτική ολογραφία		X	X	X (πιθανό)
Θερμική επιθεώρηση	X	X	X	X (πιθανό)
Μικροκύματα	X	X		X
Δινορεύματα	X	X	X	X
Εκτροπή ηλεκτρικού ρεύματος	X		X	X
Μαγνητικά σωματίδια	X	X	X	X (περιορισμένη)
Μαγνητικά πεδία	X		X	X
Ραδιογραφία νετρονίων		X		X
Ραδιογραφία ακτίνων X		X		X
Υπέρηχοι	X	X	X	X
Διεισδυτικά υγρά		X (επιφανειακές)	X	
Ρεπλίκια	X	X (επιφανειακές)	X	
Οπτικές μέθοδοι	X	X (επιφανειακές)	X	

Πίνακας 3.3

Σύγκριση των τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου σε σχέση με το σχήμα του υπό εξέταση αντικειμένου
<u>Απλό σχήμα:</u> οπτική ολογραφία, θερμική επιθεώρηση, μικροκύματα, δινορεύματα, μαγνητικά πεδία, σκέδαση νετρονίων, ακτίνες X, υπέρηχοι, διεισδυτικά υγρά, ρεπλίκια, οπτικές μέθοδοι
<u>Πολύπλοκο σχήμα:</u> ...

Πίνακας 3.4

Μέθοδοι NDE και χαρακτηριστικά των υλικών που επιθεωρούν	
Μέθοδος	Χαρακτηριστικά
Διεισδυτικά υγρά	Η ατέλεια πρέπει να βγαίνει στην επιφάνεια
Μαγνητικά σωματίδια	Το υλικό πρέπει να είναι μαγνητικό
Δινορεύματα	Το υλικό πρέπει να είναι μαγνητικό ή ηλεκτρικά αγωγίμο
Μικροκύματα	Να διαδίδονται σ' αυτό τα μικροκύματα
Ραδιογραφία ακτίνων X	Αλλαγές στο πάχος, την πυκνότητα ή τη σύνθεση
Ραδιογραφία νετρονίων	Αλλαγές στο πάχος, την πυκνότητα ή τη σύνθεση
Οπτική ολογραφία	Επιφανειακές οπτικές ιδιότητες

Πίνακας 3.5

3.8.1 Εντοπισμός διαρροής και αξιολόγηση

Λόγω του ότι πολλά αντικείμενα πρέπει να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις ο μη καταστροφικός προσδιορισμός των διαρροών είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Κάθε τεχνική έχει ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στο να καθοριστούν για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα τα επίπεδα αποδεκτών ορίων διαρροής.

3.8.2 Μετρολογία και αξιολόγηση

Οι διαστασιακές μετρήσεις είναι από τις πιο χρησιμοποιούμενες μη καταστροφικές δραστηριότητες. Εκτός από τις συμβατικές μεθόδους διαστασιολόγησης η σύγχρονη μετρολογία χρησιμοποιεί την τεχνολογία των λέιζερ, σύγχρονα οπτικά μέσα και ρομποτικά συστήματα. Επιπρόσθετα, εφαρμογή στο πεδίο της μετρολογίας έχουν και μέθοδοι όπως τα δινορεύματα, οι υπέρηχοι και η οπτική ολογραφία.

3.8.3 Προσδιορισμός θέσης ατελειών και αξιολόγηση

Πολλές φορές τίθεται το πρόβλημα αν μια κατασκευή που αποτελείται από περισσότερα από δύο μέρη περιέχει ατέλειες στις περιοχές σύνδεσης και στις διεπιφάνειες δύο ή παραπάνω υλικών. Αυτού του είδους ο μη καταστροφικός έλεγχος καλείται προσδιορισμός θέσης. Οι πιο κοινές τεχνικές που καλύπτουν αυτό το πεδίο είναι οι ακτίνες Χ, η τομογραφία που πραγματοποιείται με τη βοήθεια ακτινών Χ και η ραδιογραφία νετρονίων.

3.8.4 Χαρακτηρισμός μικροδομής

Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής μπορεί να λάβει χώρα επί τόπου χωρίς να προκληθεί ζημιά στο υπό εξέταση αντικείμενο με χρήση της μεθόδου της ρεπλίκας ή τεχνικών συμβατικής οπτικής μικροσκοπίας με κινητό εξοπλισμό που περιλαμβάνει υλικά και μέσα για στίλβωση, προσβολή και μικροσκόπιο. Ακόμα είναι δυνατό να εκτιμήσουμε τη μικροδομή συσχετίζοντας κάποιες πληροφορίες που λαμβάνονται από τις μη καταστροφικές δοκιμές [π.χ. η εκπομπή μιας τιμής ενέργειας (στην περιοχή των υπερήχων) έχει συσχετιστεί με τη μικροδομή του γκρίζου χυτοσιδήρου]. Τέλος, η μικροδομή εκτιμάται μέσα από τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων γιατί συνήθως υπάρχει σχέση μεταξύ δομής, ιδιοτήτων και απόκρισης μη καταστροφικής τεχνικής.

3.8.5 Εκτίμηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων

Ο συγκεκριμένος είναι ένας από τους ταχέως αναπτυσσόμενους τομείς του πεδίου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ιδιότητες αυτές εκτιμώνται έμμεσα από τη μελέτη της μικροδομής. Εκτός από τις υπόλοιπες τεχνικές που εφαρμόζονται στα μέταλλα, τα μικροκύματα μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες των μη μεταλλικών (διηλεκτρικών και μη αγώγιμων) υλικών.

3.8.6 Προσδιορισμός δυνάμεων-τάσεων και δυναμικής απόκρισης

Η τάση σε μια περιοχή ενός αντικειμένου το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μεθόδων εύρεσης φοράς δύναμης όπως αυτές της φωτοελαστικής επικάλυψης, της ψαθυρής επικάλυψης, των δυναμοκυψελών. Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στα υλικά, όπως περίθλαση ακτίνων Χ, υπέρηχοι και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.

Η δυναμική συμπεριφορά ενός αντικειμένου είναι δυνατό να εκτιμηθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, εφαρμόζοντας τεχνολογία εύρεσης φοράς τάσης όσο το αντικείμενο φορτίζεται δυναμικά. Επιπλέον επιταχυνσιόμετρα και ακουστικοί μορφομετατροπείς χρησιμοποιούνται ώστε να ληφθεί μια δυναμική απόκριση από την κατασκευή που υποβάλλεται στη φόρτιση. Η δυναμική απόκριση ονομάζεται «υπογραφή» και η εκτίμηση αυτής «ανάλυση υπογραφής». Η φύση αυτής της υπογραφής συσχετίζεται με διάφορα προβλήματα όπως ο μηχανικός θόρυβος, οι δονήσεις και η κατασκευαστική αστάθεια.

3.9 Κλασικές τεχνικές μη καταστροφικών δοκιμών

3.9.1 Μικροσκοπία με τις Τεχνικές της Ρεπλίκας

Η «επί τόπου» εξέταση της φθοράς στη μικροδομή, καθώς επίσης και της καταστροφής των υλικών που εκτίθενται σε διάφορα περιβάλλοντα, είναι ο σκοπός πολλών μη καταστροφικών δοκιμών. Η συνηθισμένη μέθοδος της μεταλλογραφικής παρατήρησης, η οποία συνεπάγεται το κόψιμο κομματιών από το αντικείμενο που θέλουμε να επιθεωρήσουμε, παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι καθιστά το αντικείμενο ακατάλληλο για χρήση ή σε μια καλύτερη περίπτωση αυτό επισκευάζεται αλλά με αυξημένο κόστος. Έτσι λοιπόν, σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες που η καταστροφή μέρους των εγκαταστάσεων απαγορεύεται, η μεταλλογραφική εξέταση αποφεύγεται στερώντας έτσι από πολύ σημαντικές πληροφορίες για την ικανοποιητική λειτουργία των εξαρτημάτων. Έτσι λοιπόν, η ρεπλίκா είναι μια πολύ ανεπτυγμένη μέθοδος προετοιμασίας δοκιμίου για ηλεκτρονική μικροσκοπία η οποία ωστόσο χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή «επί τόπου» μετρήσεων της μικροδομής ενός εξαρτήματος στα πλαίσια των μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου.

Η προετοιμασία του δείγματος γίνεται ως εξής:

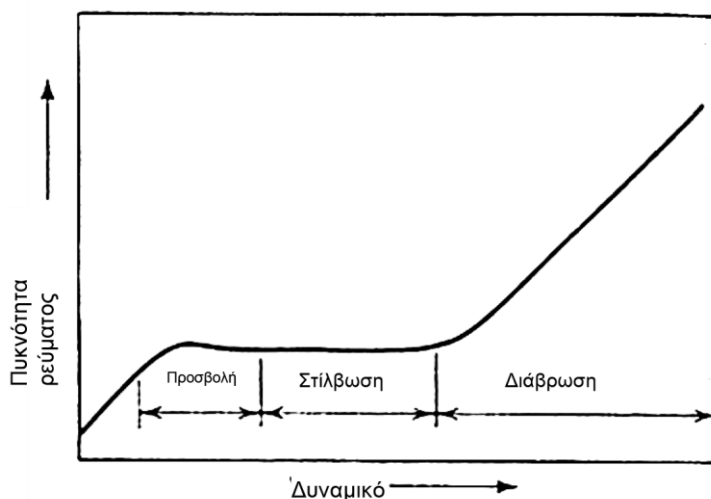
A) Με μηχανικές μεθόδους προετοιμασίας και προσβολής

Τα περισσότερα εξαρτήματα μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας τους αναπτύσσουν στην επιφάνειά τους προϊόντα οξείδωσης ή διάβρωσης ή αποκτούν ακόμη και στρώματα στα οποία έχει επέλθει απανθράκωση. Αυτά πρέπει να απομακρυνθούν πριν από τη διαδικασία της παραγωγής της ρεπλίκας. Ο κλασικός εργαστηριακός εξοπλισμός με τα λειαντικά χαρτιά διαφόρων μεγεθών κόκκου είναι ικανός για τη διεργασία αυτή, αρκεί να μην προκαλεί ανεπιθύμητη υπερθέρμανση ή πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια. Η αμμοβολή, οι ακτινωτοί τροχοί, οι τροχοί με πτερύγια και οι αποξεστικοί δίσκοι έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της στίλβωσης κατά το οποίο χρησιμοποιούνται αποξεστικοί δίσκοι καρβιδίου του πυριτίου σε συνδυασμό με πάστα διαμαντιού ή αλουμινίου. Το τελικό στάδιο της διαδικασίας είναι η προσβολή ώστε να αναπτυχθεί η μικροδομή και πολλές φορές χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία δύο και τρεις φορές.

B) Ηλεκτρολυτική τεχνική προετοιμασίας και προσβολής

Η τεχνική της ηλεκτροστίλβωσης καταφέρνει να απομακρύνει υλικό μέσω μιας ηλεκτρολυτικής αντίδρασης και να παράγει έτσι μια επιφάνεια χωρίς γραμμές. Το δείγμα καταλαμβάνει το χώρο της ανόδου ενώ η κάθοδος συνδέεται με την άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται στίλβωση και προσβολή ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση και την πυκνότητα του ρεύματος, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.38**. Ωστόσο για μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος συμβαίνει εκτενής διάβρωση στο κομμάτι, κάτι που θα πρέπει να αποφεύγεται ώστε να μην εισχωρούν ανεπιθύμητα στοιχεία στη μικροδομή. Οι κοιλότητες διάβρωσης που δημιουργούνται λόγω της διάβρωσης (pits) μπερδεύονται συχνά με τα κενά ολίσθησης (creep voids).

Υπάρχουν όμως εγκαταστάσεις όπως τα πυρηνικά εργοστάσια όπου είναι επικίνδυνο να πραγματοποιηθούν ηλεκτροστίλβωτικές μέθοδοι ή να γίνει χρήση οξέως διότι δημιουργούνται προϋποθέσεις για ενδόκοκη ρωγμάτωση λόγω διαβρωτικών δυνάμεων (stress-corrosion-cracking).



Σχήμα 3.38 Καμπύλη πυκνότητας ρεύματος – τάσης για την ηλεκτροστίλβωση.

Τεχνικές ρεπλίκας

Οι κατηγορίες της ρεπλίκας είναι ουσιαστικά δύο, αυτή της ρεπλίκας επιφανείας και της εξαγωγικής ρεπλίκας. Η πρώτη δίνει την τοπογραφία της επιφανείας ενώ η δεύτερη αποσπά σωματίδια από το δείγμα και τα τοποθετεί σε μια άλλη επιφάνεια. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάποιων τεχνικών ρεπλίκας εικονίζονται στον **Πίνακα 3.6**.

ΤΥΠΟΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Ρεπλίκες επιφανείας		
Οξική	Πολύ καλή ανάλυση	Χρειάζεται κάποιο επίστρωμα
Ακρυλική	Άμεση οπτική επιθεώρηση	Κολλάει εύκολα
Ελαστικό	Εύκολη απομάκρυνση	Μέτρια ανάλυση
Εξαγωγικές ρεπλίκες		
Πλαστική	Εύκολη προετοιμασία	Συγκράτηση σωματιδίων
Άνθρακα	Συγκρότηση σωματιδίων με προσβολή δύο σημείων	Χρειάζεται επίστρωμα
Άμεσης εφαρμογής με άνθρακα	Πολύ καλή ανάλυση	Δεν χρησιμοποιείται για επί τύπου επιθεωρήσεις

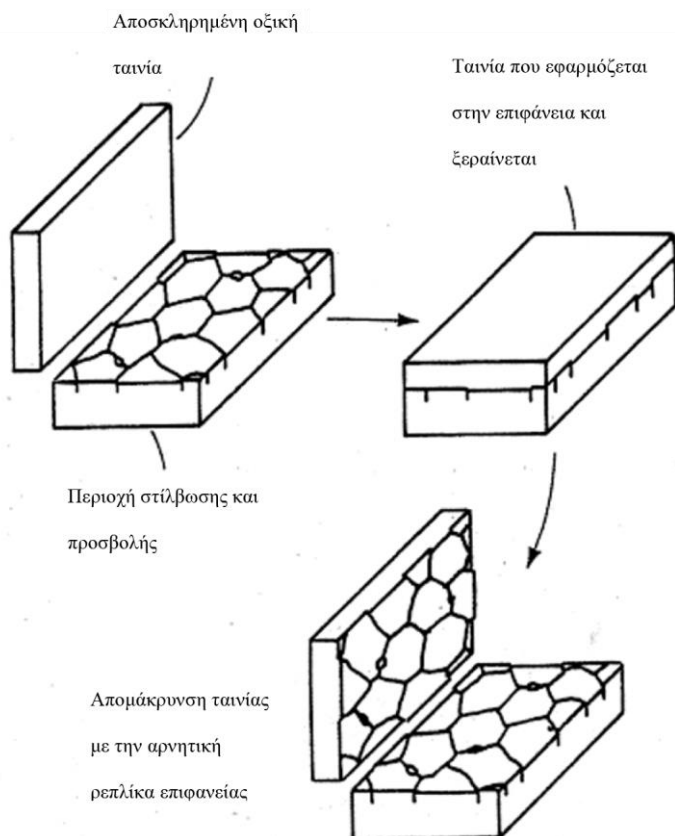
Πίνακας 3.6 Σύγκριση τεχνικών Ρεπλίκας.

Ρεπλίκια επιφανείας

Για την παραγωγή ρεπλίκας επιφανείας υπάρχουν η άμεση μέθοδος και η έμμεση μέθοδος. Στον άμεσο τρόπο η ρεπλίκια δημιουργείται από την επιφάνεια του αντικειμένου και μετά εξετάζεται στο μικροσκόπιο (τεχνική ενός σταδίου) ενώ στην άλλη περίπτωση η τελική ρεπλίκια προκύπτει από μία πρώτη ρεπλίκια της επιφανείας (τεχνική δύο σταδίων). Η άμεση μέθοδος είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και τα πιο συνηθισμένα υλικά ρεπλίκας είναι το πλαστικό, ο άνθρακας ή κάποιο οξείδιο. Εκτός τού πλαστικού όλες οι άλλες μέθοδοι είναι καταστροφικές. Ιδιαίτερα αποτελεσματικά ως υλικά, για τη μέθοδο του πλαστικού είναι η ακρυλική ρητίνη και το ελαστικό. Η εκλογή του υλικού εξαρτάται από τη γεωμετρία του αντικειμένου και από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά που θέλουμε να εξετάσουμε.

Οι πλαστικές ρεπλίκες, εξετάζονται στο οπτικό μικροσκόπιο, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης (SEM και TEM) ανάλογα με την επιθυμητή ανάλυση. Η διαδικασία αρχίζει με την προσθήκη ενός πλαστικού φιλμ σε

διαλυτικό ώστε να μαλακώσει, εφαρμογή στη συνέχεια αυτού του φιλμ πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια και τέλος σκλήρυνσή του, καθώς το διαλυτικό εξατμίζεται (**Σχήμα 3.39**).



Σχήμα 3.39 Τεχνική της πλαστικής ρεπλίκας.

Για καλύτερη ανάλυση η πίσω μεριά της ρεπλίκας βάφεται με μαύρη μπογιά ή μελάνι, πριν την απομάκρυνσή της από το αντικείμενο. Για τον ίδιο σκοπό υπάρχουν και εξατμιζόμενα επιστρώματα από άνθρακα, αλουμίνιο ή και χρυσό που εφαρμόζεται σε γωνία σκιάς 45° στην μπροστινή πλευρά της ρεπλίκας μετά την απομάκρυνσή της από το δείγμα.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής έναντι του κινητού μικροσκοπίου είναι:

- Η απόκτηση ενός μόνιμου αποτυπώματος του δείγματος.
- Καλύτερη ανάλυση και δυνατότητα περαιτέρω μεγέθυνσης.
- Μειωμένη μόλυνση της στιλβωμένης επιφάνειας.
- Λιγότερος χρόνος παραμονής σε επικίνδυνο περιβάλλον.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.

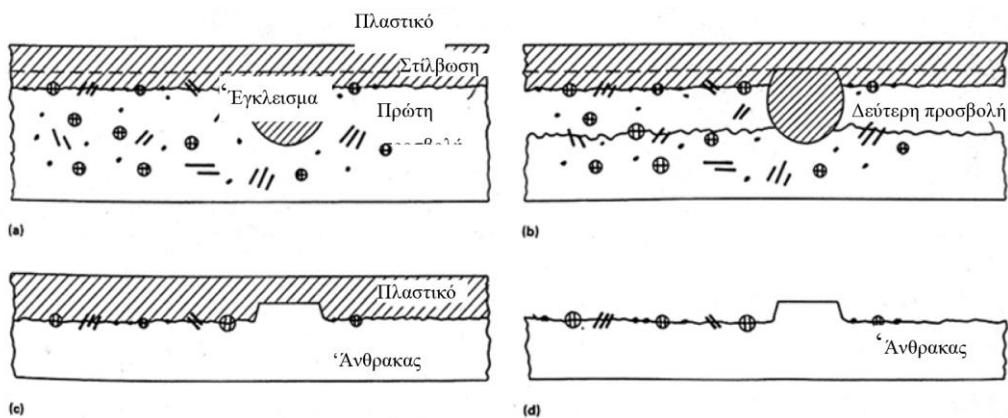
Ρεπλίκας εξαγωγής

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την τεχνική αυτή, η οποία χρησιμοποιείται για να χαρακτηριστούν μικρά σωματίδια τα οποία έχουν ενσωματωθεί σε μια μήτρα, όπως σωματίδια μιας δεύτερης φάσης στον χάλυβα.

Μετά την προετοιμασία του κομματιού το πρώτο βήμα είναι η βαριά προσβολή του κράματος ώστε να εκτεθούν τα σωματίδια που μας ενδιαφέρουν. Στη συνέχεια όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.40**, δημιουργείται το αρνητικό αντίγραφο σε ένα κομμάτι πολυμερικού φιλμ

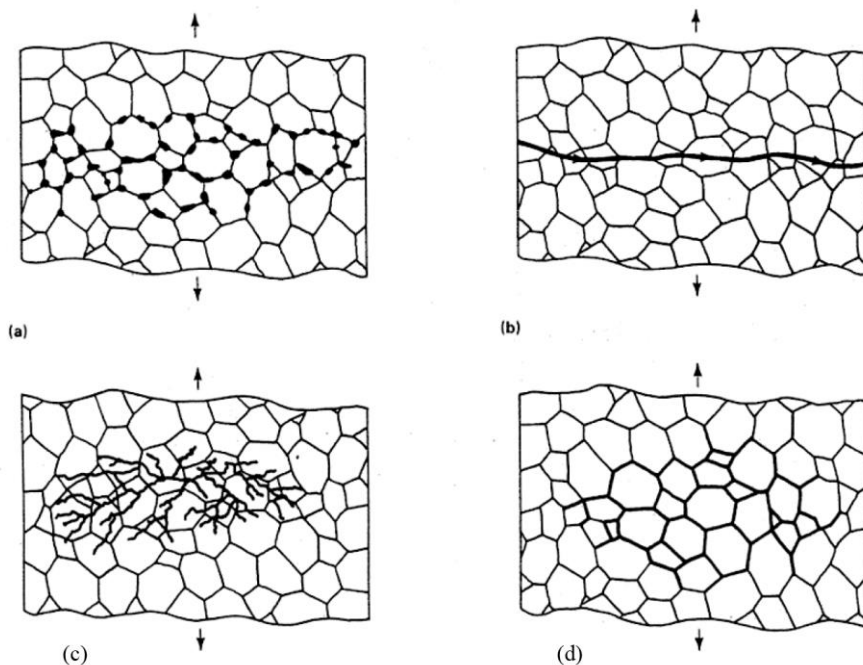
(οξικοκυταρική ταινία) που έχει πάνω διαλυτικό και τοποθετείται με πίεση πάνω στην επιφάνεια. Με την εξάτμιση του διαλυτικού τελειώνει και το πρώτο στάδιο.

Ενδέχεται το υλικό να υποβληθεί και σε δεύτερη προσβολή, ώστε να ελευθερωθούν τα σωματίδια που εκτέθηκαν με την πρώτη προσβολή. Η δεύτερη προσβολή γίνεται χωρίς την απομάκρυνση του πλαστικού, αλλά διαμέσου αυτού (τα περισσότερα επιτρέπουν τη διέλευση διαλυμάτων και η προσβολή πραγματοποιείται πολύ γρήγορα). Στη συνέχεια η ταινία απομακρύνεται προσεχτικά από το αντικείμενο δημιουργώντας το αρνητικό της επιφάνειας. Κατόπιν εξατμίζεται άνθρακας σε συνθήκες κενού και εναποτίθεται πάνω στην πλαστική ταινία. Στο τελευταίο στάδιο το πλαστικό διαλύεται αποκαλύπτοντας το θετικό αντίγραφο της επιφανείας το οποίο και ξεραίνεται.



Σχήμα 3.40 Βήματα θετικής εξαγωγικής ρεπλικας με άνθρακα. (a) Τοποθέτηση του πλαστικού μετά την πρώτη προσβολή. (b) Μετά τη δεύτερη προσβολή. (c) Μετά την απόθεση του άνθρακα. (d) Η θετική ρεπλίκα μετά τη διάλυση του πλαστικού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι τεχνικές της ρεπλικας έχουν ως σκοπό τον εντοπισμό ρωγμών, κενών και κατακρημνισμάτων. Αυτές οι περιπτώσεις φαίνονται στο παρακάτω **Σχήμα 3.41**.



Σχήμα 3.41 Διάδοση διαφόρων τύπων ρωγμών (a) Ερπυσμός. (b) Κόπωση. (c) Μηχανοδιάβρωση. (d) Περικρυσταλλική διάβρωση.

3.9.2 Έλεγχος Διαρροής

Ο έλεγχος διαρροής είναι ο κλάδος των μη καταστροφικών ελέγχων που ασχολείται με την εισαγωγή ή διαφυγή υγρών ή αερίων από συστήματα ή στοιχεία συστημάτων που υποβάλλονται σε πίεση ή προορίζονται στο να συγκρατήσουν ρευστά. Η δεισδυση ή διαφυγή ενός ρευστού είναι αποτέλεσμα εμφάνισης βαθμίδας πίεσης μεταξύ δύο περιοχών ή αποτέλεσμα διαπέρασης ενός εμποδίου. Ο έλεγχος της διαρροής έχει ως σκοπό:

- Να προσδιορίσει τη θέση της διαρροής.
- Να αξιολογήσει το μέγεθος της διαρροής από το σημείο διαρροής του συστήματος.
- Να παρακολουθήσει τη διαρροή στο πεδίο του χρόνου.

Η σημασία της τεχνικής αυτής είναι μεγάλη κυρίως σε ό,τι αφορά την ασφάλεια και τη λειτουργία ενός προϊόντος ή συστήματος. Οι πιο κοινοί λόγοι για την πραγματοποίησή της είναι:

- Η πρόληψη για μη απώλεια ακριβών υλικών ή ενέργειας.
- Η πρόληψη για την προστασία του περιβάλλοντος.
- Η διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος που λειτουργεί.

Μια διαρροή μετρείται με την ποσότητα του διαρρέοντος ρευστού σε συγκεκριμένο χρόνο και συνθήκες οι οποίες πρέπει να συγκεκριμενοποιηθούν διότι επηρεάζουν πολύ το φαινόμενο. Σε δοσμένη θερμοκρασία η πίεση και ο όγκος μιας συγκεκριμένης ποσότητας αερίου είναι ανάλογα της μάζας του. Έτσι η έκταση της διαρροής εκφράζεται σε μονάδες πίεσης επί όγκο προς χρόνο. (π.χ. torr x Lit/s). Η μονάδα στο SI είναι η Pa x m³/s.

Οι μέθοδοι ελέγχου της διαρροής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την πίεση και το είδος του ρευστού στο σύστημα.

3.9.2.1 Μέθοδοι ελέγχου διαρροής σε σύστημα πίεσης χωρίς αέριο ιχνηθέτη

Ακουστική μέθοδος

Η τυρβώδης ροή ενός αερίου υπό πίεση μέσα σε κάποιο άνοιγμα παράγει θόρυβο σε συχνότητες ακουστικές και υπερακουστικές. Αν η διαρροή είναι σχετικά μεγάλη, μπορεί να ανιχνευτεί και με το αυτί. Αυτή είναι μια γρήγορη και οικονομική μέθοδος για την εύρεση μεγάλων διαρροών. Οι ακουστικές συχνότητες ανιχνεύονται και με τη βοήθεια στηθοσκοπίων ή μικροφώνων. Οι υπερακουστικοί ανιχνευτές λειτουργούν σε συχνότητες των 35 – 40 KHz και εντοπίζουν μικρότερες διαρροές. Αυτοί είναι περισσότερο ευαίσθητοι και έχουν δυνατότητα να εντοπίσουν διαρροή τυρβώδους ροής της τάξης των $10^{-2} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$.

Έλεγχος με φουσαλίδες

Μια απλή μέθοδος για έλεγχο μικρών δεξαμενών υπό πίεση συνίσταται στη βύθισή τους σε ένα υγρό και την παρατήρηση παραγομένων φουσαλίδων. Οι παράμετροι που ελέγχουν την ευαισθησία της μεθόδου είναι η πυκνότητα του υγρού, η μείωση της πίεσης πάνω από το υγρό, το βάθος που βυθίζεται η δεξαμενή και η επιφανειακή τάση του υγρού. Η ευαισθησία με τη διαδικασία αυτή μπορεί να φτάσει τα $10^{-6} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$, όμως κυρίως θεωρείται ως πρωταρχικό στάδιο ελέγχου για σχετικά μεγάλες διαρροές. Μια μικρή παραλλαγή είναι η απόθεση στρώματος υγρού (π.χ. σαπουνάδα) στην επιφάνεια και η παρατήρηση για φουσκάλες και συμβαίνει όταν εξετάζονται ιδιαίτερας μεγάλα αντικείμενα.

Ανίχνευση ροής

Έστω μια δεξαμενή, που χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλη εσωτερική πίεση, τοποθετείται μέσα σε μία μεγαλύτερη δεξαμενή η οποία στραγγίζεται εκτός έναν πολύ μικρό αγωγό που προεξέχει. Τότε διαρροή από τη μικρή δεξαμενή (υπό εξέταση δεξαμενή) συνεπάγεται αύξηση της πίεσης μέσα στη μεγαλύτερη κάτι που αποδεικνύει και το αέριο το οποίο ρέει μέσα από τον προεξέχοντα αγωγό. Η ανίχνευση της ροής γίνεται με ροόμετρα, ή αν δεν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση της πίεσης, με ογκομετρικής μετατόπισης μετρητές που αποτελούνται από έναν κύλινδρο και ένα πιστόνι, με ευαισθησία $10^{-4} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$. Τέλος είναι δυνατόν ο προεξέχων αγωγός μπορεί να βυθίζεται σε υγρό μπάνιο παράγοντας φουσαλίδες.

3.9.2.2 Έλεγχος διαρροής συστημάτων πίεσης με χρήση ανιχνευτών συγκεκριμένων αερίων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανιχνευτών διαρροών που αντιδρούν με συγκεκριμένο αέριο ή ομάδες αερίων που έχουν κάποια ιδιαίτερη φυσική ή χημική ιδιότητα κοινή. Οι μέθοδοι διαχωρίζονται σε στατικές και μη στατικές ανάλογα με το αν το αέριο ιχνηθέτης συσσωρεύεται σε ένα χώρο ή αν αντλείται μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικής πίεσης.

Μία από τις πιο απλές συσκευές αυτού του είδους είναι η ανθρώπινη μύτη η οποία μπορεί να ανιχνεύσει αέρια με χαρακτηριστική μυρωδιά και να εντοπίσει κάποιες διαρροές. Πιο αποτελεσματικές συσκευές ωστόσο είναι:

Αλλαγή χρώματος

Πρόκειται για έλεγχο με χημική αντίδραση του διαρρέοντος αερίου με κάποιο ευαίσθητο στρώμα ή αέριο. Η πιο γνωστή είναι η μέθοδος της αμμωνίας. Σ' αυτή η επιφάνεια της δεξαμενής καθαρίζεται και καλύπτεται από ένα θερμιδομετρικό ελαστικό στρώμα. Αέριο αμμωνίας συγκέντρωσης 1 έως 5% διοχετεύεται μέσα στη δεξαμενή. Αν υπάρχουν ατέλειες, τότε στο σημείο αυτό το αέριο που δραπτετεύει αλλάζει και το χρώμα του δείκτη.

Έλεγχος διόδου αλογόνου

Σ' αυτή τη μέθοδο υπάρχει ένας ανιχνευτής ο οποίος αντιδρά με τα περισσότερα αέρια που περιέχουν κάποιο αλογονούχο στοιχείο (χλώριο, βρώμιο, φθόριο, ιώδιο). Όταν λοιπόν μία δεξαμενή υποβάλλεται σε πίεση, ένα ανιχνευτικό επιστόμιο χρησιμοποιείται για να εντοπίσει

τη διαρροή. Ο αισθητήρας – ανιχνευτής της διαρροής λειτουργεί με την αρχή της εκπομπής ιόντων από μία θερμαινόμενη πλάκα σε ένα συλλέκτη. Η εκπομπή κατιόντων αυξάνει ανάλογα με την ποσότητα του αερίου μίγματος – αλογόνου. Οι αλλαγές που επέρχονται στο ιοντικό ρεύμα μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα που αντιστοιχεί σε κάποια διαρροή. Η ευαισθησία της μεθόδου φτάνει τα $10^{-6} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$.

Εξαφθοριούχο θείο

Η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της αιχμαλώτισης ηλεκτρονίων. Στη μέση ενός μικρού κυλινδρικού θαλάμου βρίσκεται ο μονωμένος ανιχνευτής από εξαφθοριούχο θείο, ενώ το εσωτερικό του είναι επικαλυμμένο με ραδιενεργό υλικό (π.χ. τρίτιο). Τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας που εκπέμπονται από το τρίτιο συλλέγονται στον ανιχνευτή δημιουργώντας διαφορά δυναμικού ανάμεσά τους. Το ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει σ'ένα κλειστό κύκλωμα μεταφράζεται σε σήμα, αφού προηγουμένως ενισχυθεί. Όταν υπάρχει διαρροή μεταβάλλεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αιχμαλωτίζει ο ανιχνευτής διαφοροποιώντας την ένδειξη του ρεύματος. Η ευαισθησία φτάνει τα $10^{-8} \times \text{mL/s}$.

Ανιχνευτές καιγόμενου αερίου

Αυτοί χρησιμοποιούνται για να προειδοποιούν σε περίπτωση επικίνδυνων καταστάσεων αφού έχουν την ικανότητα να μετρούν μίγματα καιγόμενων αερίων, πολύ μικρότερα των επικίνδυνων επιπέδων συγκέντρωσης. Η λειτουργία βασίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός καταλυτικού στοιχείου που θερμαίνεται στην παρουσία καιγόμενου αερίου. Η μικρότερη ευαισθησία είναι τα 500ppm, δηλαδή επίπεδα διαρροής $10^{-5} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$.

Ανιχνευτές θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα ενός αερίου μπορεί να μετρηθεί με τη μέθοδο της γέφυρας σε ένα ζεστό σύρμα. Η θερμοκρασία και η αντίσταση ενός σύρματος σε ένα δοχείο εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του αερίου που το περιβάλλει με την προϋπόθεση ότι η εισερχόμενη ενέργεια διατηρείται σταθερή. Εναλλακτικά, η θερμοκρασία του σύρματος μπορεί να διατηρηθεί σταθερή και να μετρηθεί η μεταβολή στην παροχή ενέργειας είτε έμμεσα (δυναμικό) είτε άμεσα (ρεύμα).

Αναλυτές υπερύθρων

Μπορούν να εντοπίσουν μίγματα αερίων τα οποία έχουν δυνατή απορρόφηση στο φάσμα των υπερύθρων (π.χ. το νιτρικό οξύ) συγκρίνοντάς το με τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενός καθαρού διακριβωμένου δείγματος αερίων όμοιας σύνθεσης. Τα δύο αέρια περιέχονται σε δύο σωλήνες που χωρίζονται με διάφραγμα λεπτού μετάλλου το οποίο σε συνδυασμό με παρακείμενη μονωμένη μεταλλική πλάκα σχηματίζουν πυκνωτή. Αν το σύστημα ισορροπεί (δηλαδή αν στους δύο σωλήνες περιέχεται το ίδιο αέριο) δεν υπάρχει διαφορικό στην πίεση. Αν όμως στον ένα σωλήνα εισρέει διαφορετικό αέριο, τότε η απορρόφηση θερμότητας είναι διαφορετική με συνέπεια αλλαγή στην πίεση και μετακίνηση του διαφράγματος. Αυτό έχει επίδραση στη χωρητικότητα του πυκνωτή. Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύσει μέχρι μερικά μέρη στο εκατομμύριο.

Έλεγχος με φασματόμετρο μάζας

Το αέριο εισέρχεται στον αναλυτή όπου τα άτομα του βομβαρδίζονται από νέφος ηλεκτρονίων που εκπέμπεται από νήμα και χάνουν ένα ηλεκτρόνιο, δηλαδή μετατρέπονται σε ιόντα. Αυτά επιταχύνονται ηλεκτροστατικά αποκτώντας μεγάλη ταχύτητα και μπαίνουν σε μαγνητικό πεδίο κάθετο στην ταχύτητά τους. Η ακτίνα που διαγράφουν μέσα στο χώρο εξαρτάται από τη μάζα του ιόντος, από το μαγνητικό πεδίο και από την αρχική επιτάχυνση. Η εξεταζόμενη ροή λοιπόν, προσδιορίζεται με αυτό τον τρόπο αφού είναι ανάλογη της ποσότητας των ιόντων που χτυπούν τελικά στον στόχο. Θεωρητικά η ευαισθησία τους φτάνει το $10^{-8} - 10^{-9} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$. Τα φασματόμετρα είναι ιδανικά για τον έλεγχο διαρροής στα συστήματα κενού.

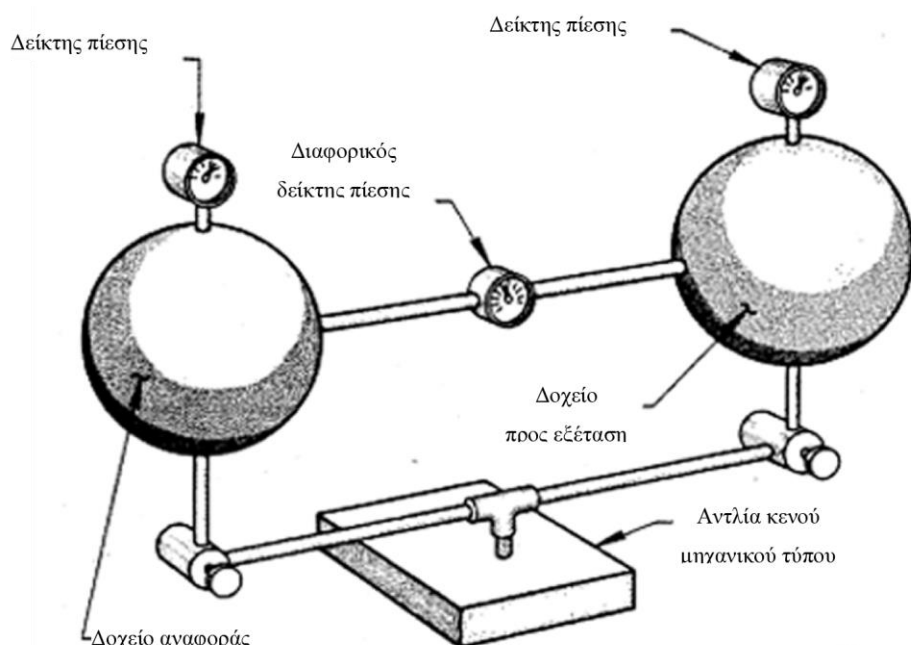
Έλεγχος με ραδιοϊσότοπα

Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος γίνεται μέσω διαλυμάτων που περιέχουν ραδιενεργούς ιχνηθέτες. Μέσα σε διαλύτες, που συνήθως είναι το νερό ή οι υδρογονάνθρακες, διαλύονται

άλατα και σύνθετα μίγματα που εμπεριέχουν ραδιοϊσότοπα όπως π.χ. το ισότοπο του νατρίου Na. Η μέθοδος συνίσταται στο γέμισμα με το διάλυμα του εξαρτήματος και την εφαρμογή πίεσης για λίγο χρόνο. Ακολουθεί ξέπλυμα και βομβαρδισμός με ακτίνα γ. Ανιχνευτής των ακτινών γ προσδιορίζει τη θέση των διαρροών από την εκπεμπόμενη από το ραδιενεργό υλικό ακτινοβολία γ που έχει εγκλωβιστεί στα σημεία αυτά.

3.9.2.3 Προσδιορισμός ποσότητας απώλειας ρευστού

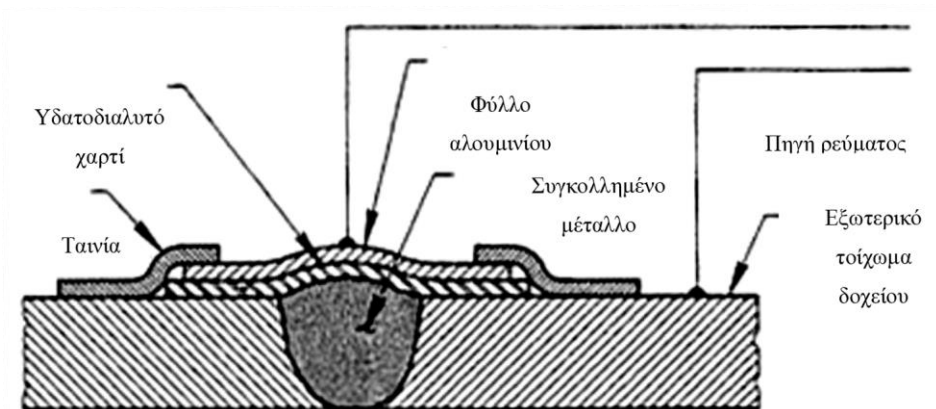
Ποσοτικός προσδιορισμός της απώλειας από ένα σύστημα είναι πολύ περιορισμένης αξιοπιστίας και τούτο διότι ο υπολογισμός του βάρους του ρευστού είναι δύσκολος από συγκριτική άποψη. Είναι εφικτό μόνο όταν το βάρος του εξαρτήματος είναι συγκρινόμενο με το ρευστό που περιέχει. Η μέθοδος της διαφορικής πίεσης εικονίζεται στο **Σχήμα 3.42** και έχει ευαισθησία $10^{-4} \text{ Atm} \times \text{cm}^3/\text{s}$.



Σχήμα 3.42 Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης ενός δείκτη διαφορικής πίεσης μεταξύ ενός δοχείου αναφοράς και ενός υπό εξέταση δοχείου για τον εντοπισμό διαρροών.

Τέλος η πιο απλή μέθοδος ελέγχου ενός γεμισμένου δοχείου είναι η οπτική παρατήρηση, για σχετικά μεγάλες όμως διαρροές και με σχετικά μεγάλες πιθανότητες ανακρίβειας αφού υπεισέρχεται σε σημαντικό βαθμό ο όρος υποκειμενικότητα. Οπτικά βοηθήματα αποτελούν οι καθρέπτες, οι φακοί, τα μικροσκόπια, τα ενδοσκόπια, οι οπτικές ίνες και οι μεγεθυντικοί φακοί που επιτρέπουν διεξαγωγή μετρήσεων και δοκιμών έρευνας πέρα από τις δυνατότητες των ανθρώπινων οργάνων.

Δύο αξιοπρόσεχτες οπτικές μέθοδοι είναι οι ακόλουθες. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.43** ένα στρώμα από φύλλο αλουμινίου είναι απλωμένο πάνω σε ένα στρώμα υδατοδιαλυτού χαρτιού. Τα στρώματα αυτά τοποθετούνται πάνω στην ένωση της συγκόλλησης. Αν υπάρχει διαρροή νερού τότε το χαρτί διαλύεται και τότε μεταξύ του φύλλου αλουμινίου και του δοχείου θα αποκατασταθεί ηλεκτρική επαφή. Η ένδειξη της αλλαγής στην αντίσταση μαρτυρεί τη διαρροή.



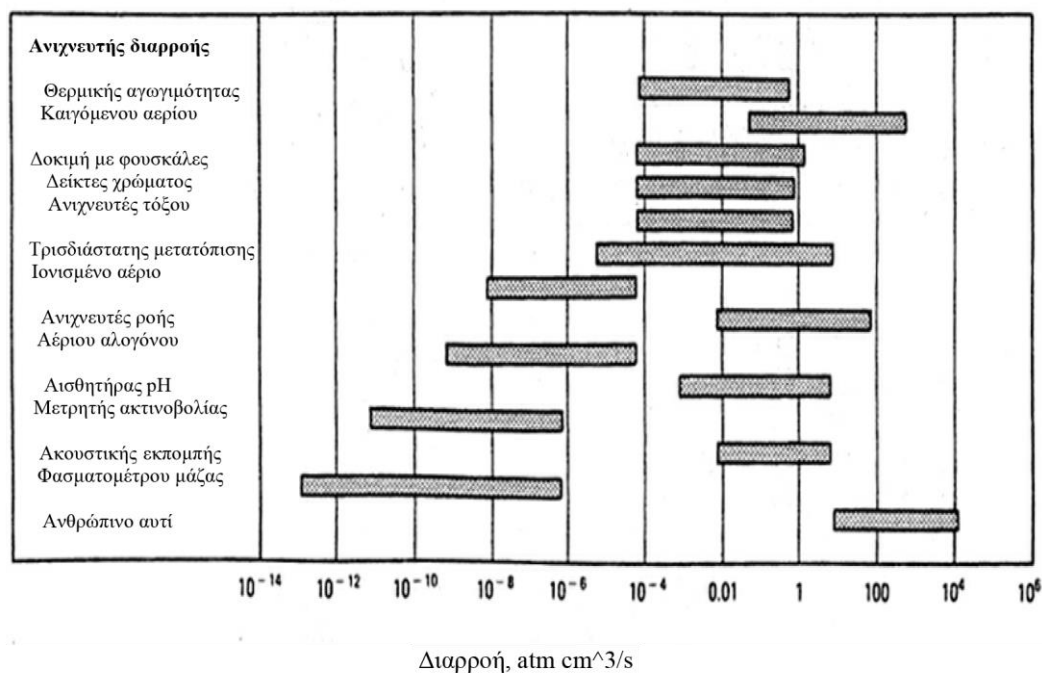
Σχήμα 3.43 Διατομή μιας συγκολλημένης ραφής σε ένα δοχείο γεμάτο νερό όπου φαίνονται τα στρώματα υδατοδιαλυτού χαρτί και φύλλου αλουμινίου για την ανίχνευση διαρροής στην ένωση.

Πολύ διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή των διεισδυτικών υγρών που ταιριάζει εξίσου και για σιδηρούχα και για μη σιδηρούχα, καθώς επίσης και για μη μεταλλικά υλικά.

Οι τρεις βασικοί λόγοι που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου ελέγχου διαρροής είναι:

- φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος και του ρευστού ιχνηθέτη,
- το μέγεθος τής προς μέτρηση διαρροής,
- ο λόγος που διεξάγεται η δοκιμή (δηλαδή ο ακριβής εντοπισμός ή απλώς η ανίχνευση ή μέτρηση του μεγέθους της διαρροής).

Οι κατάλληλες μέθοδοι για διάφορα μεγέθη παρατίθενται στο **Σχήμα 3.44**.



Σχήμα 3.44 Προσεγγιστικά όρια λειτουργίας διαφόρων ανιχνευτών και μεθόδων ανίχνευσης διαρροής.

3.9.3 Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά

Η επιθεώρηση με τη χρήση διεισδυτικών υγρών είναι μια μη καταστροφική μέθοδος αποκάλυψης των ασυνεχειών που φτάνουν μέχρι τις επιφάνειες των στέρεων υλικών χωρίς ουσιαστικό πορώδες. Είναι δυνατό με τα διεισδυτικά υγρά να προκύψουν ενδείξεις για ευρύ φάσμα μεγεθών των ατελειών, ανεξάρτητα και από τη διαμόρφωση του προς εργασία αντικειμένου και από τον προσανατολισμό των ατελειών. Τα υγρά αυτά διαποτίζονται σε διάφορους τύπους μικροσκοπικών επιφανειακών ατελειών σύμφωνα με το τριχοειδές φαινόμενο. Γι' αυτόν τον λόγο είναι ιδανική μέθοδος για την ανίχνευση όλων των τύπων των επιφανειακών ρωγμών, πτυχών, πορώδους, περιοχών συστολής, λεπτών στρωμάτων και ασυνεχειών. Χρησιμοποιείται εκτενώς για την εξέταση κατεργασμένων και χυτών προϊόντων σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μετάλλων, στη μεταλλουργία κόνεων, στα κεραμικά, στα πλαστικά και στα γυάλινα αντικείμενα. Ο μεγαλύτερος περιορισμός είναι ότι αποκαλύπτονται μόνο ατέλειες που βγαίνουν στην επιφάνεια. Ένας άλλος παράγοντας που περιορίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι η επιφανειακή σκληρότητα και το πορώδες. Αυτές οι επιφάνειες παράγουν υπερογκώδες φόντο που μπερδεύει στην παρατήρησή τους.

3.9.3.1 Φυσικές αρχές

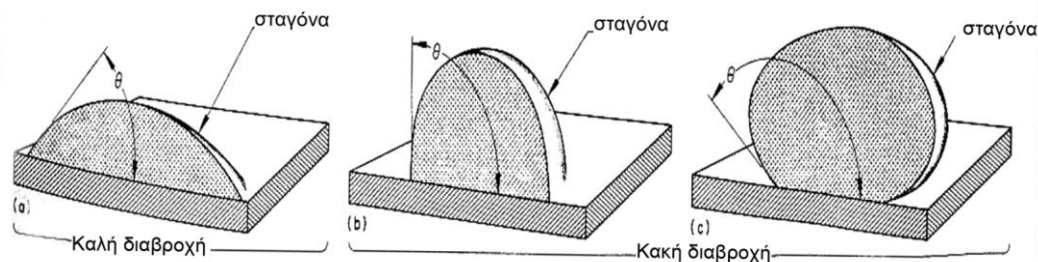
Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την αποτελεσματική διαβροχή της επιφάνειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο στρώμα από το διεισδυτικό υγρό το οποίο θα μετακινηθεί μέσα στις κοιλότητες. Οι κοιλότητες που ενδιαφέρουν είναι συνήθως πολύ μικρές, αόρατες με το ανθρώπινο μάτι. Η ικανότητα διείσδυσης του υγρού σ' αυτές εξαρτάται περισσότερο από:

- την καθαρότητα της επιφάνειας,
- τη διαμόρφωση της κοιλότητας,
- την καθαρότητα της κοιλότητας,
- το μέγεθος του επιφανειακού ανοίγματος της κοιλότητας,
- την επιφανειακή τάση του υγρού,
- την ικανότητα του υγρού να διαβρέξει την επιφάνεια,
- τη γωνία επαφής του υγρού.

Οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων ενός υγρού προκαλούν επιφανειακή τάση. Ένα παράδειγμα της επίδρασης της επιφανειακής τάσης είναι η τάση του ελεύθερου υγρού, όπως μια σταγόνα νερού, να γίνει σφαίρα. Η επιφανειακή τάση, τότε, αντισταθμίζεται από την εσωτερική υδροστατική πίεση του υγρού.

Όταν ένα υγρό έρχεται σε επαφή με μια επιφάνεια, οι δυνάμεις συνοχής αντιμάχονται τις δυνάμεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του υγρού και της στερεής επιφάνειας.

Αυτές οι δυνάμεις καθορίζουν και τη γωνία επαφής, για την οποία ισχύει ότι, αν είναι μικρότερη από 90° , το υγρό διαβρέχει την επιφάνεια, έχει δηλαδή καλή διαβροχική ικανότητα, ενώ αν (η γωνία) είναι ίση ή μεγαλύτερη από 90° , η ικανότητα αυτή είναι μικρή (**Σχήμα 3.45**).



Σχήμα 3.45 Χαρακτηριστικά διαβροχής μεταξύ μιας σταγόνας υγρού και μιας στερεής επιφάνειας ως προς γωνία θ . Όταν η γωνία $\theta < 90^\circ$, η διαβροχή είναι καλή. Όταν η γωνία $\theta \geq 90^\circ$, η διαβροχή είναι φτωχή.

Στενά συνδεδεμένη με την ικανότητα διαβροχής είναι και το φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης ή ταπείνωσης (**Σχήμα 3.46**).

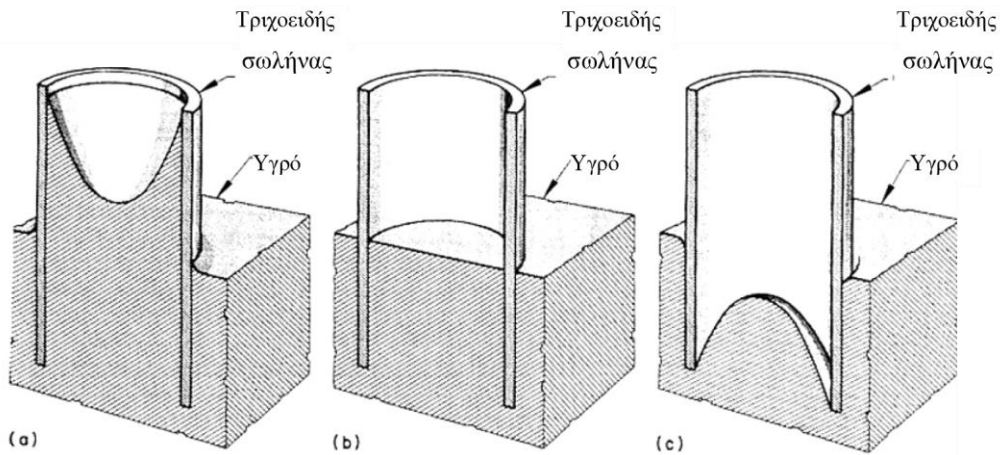
Αν η γωνία επαφής μεταξύ του υγρού και του τριχοειδούς σωλήνα είναι μικρότερη των 90° , τότε ο υγρός μηνίσκος στο σωλήνα είναι κοίλος και το υγρό ανυψώνεται. Αν η γωνία είναι μεγαλύτερη των 90° , το υγρό ταπεινώνεται και δεν διαβρέχει τον σωλήνα, ενώ ο μηνίσκος είναι κυρτός. Αν πάλι η γωνία είναι ίση με 90° , τίποτα από τα δύο δεν συμβαίνει.

Στην τριχοειδή ανύψωση αυτό που συμβαίνει είναι ότι η υδροστατική πίεση ακριβώς κάτω από τον μηνίσκο μειώνεται λόγω της διανομής της επιφανειακής τάσης στην κοίλη επιφάνεια και το υγρό ανέρχεται στον σωλήνα λόγω της υδραυλικής ατμοσφαιρικής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Στο **Σχήμα 3.47** φαίνονται οι επιβαλλόμενες δυνάμεις που ασκούνται στο υγρό. Το ύψος στο οποίο τελικά ανέρχεται το υγρό είναι ευθέως ανάλογο με την επιφανειακή τάση και το συνημίτονο της γωνίας επαφής και αντιστρόφως ανάλογο με την πυκνότητα του υγρού και την ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα.

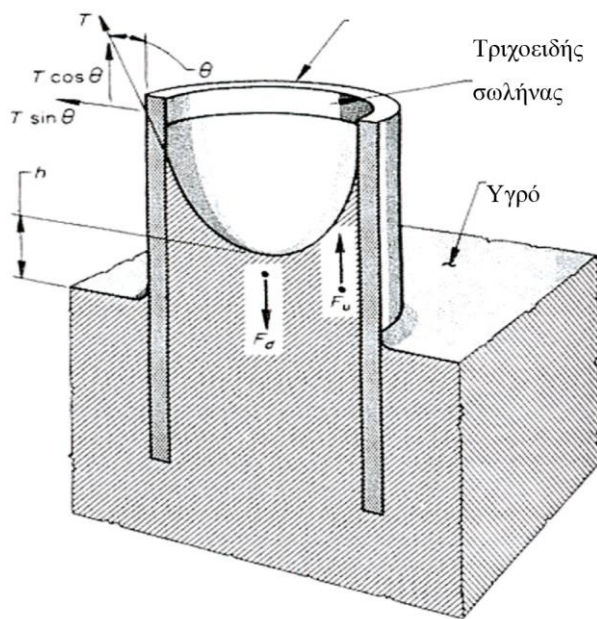
Αυτές οι φυσικές αρχές χαρακτηρίζουν τα διεισδυτικά υγρά στην προσπάθειά τους να εισέλθουν σε λεπτές επιφανειακές ασυνέχειες, αν και πρακτικά τα φαινόμενα είναι περισσότερο πολύπλοκα (π.χ. οι ρωγμές δεν είναι τριχοειδείς σωλήνες όμως ανταποκρίνονται στη βασική αλληλεπίδραση μεταξύ ενός υγρού και μιας στερεής επιφάνειας).

Το ιξώδες του υγρού έχει αμελητέα επίδραση στη διεισδυτικότητά του. Γενικά, όμως, υγρά με μεγάλο ιξώδες είναι ακατάλληλα για την εργασία αυτή επειδή δεν ρέουν αρκετά γρήγορα και χρειάζονται πολύ χρόνο για να πληρώσουν τα κενά. Μια άλλη απαραίτητη ιδιότητα είναι η ικανότητα να διαλύει σημαντική ποσότητα κατάλληλου φθορίζοντος υλικού ή έγχρωμη συνθετική ένωση. Επίσης, το διεισδυτικό υγρό θα πρέπει να αφαιρείται εύκολα με κατάλληλο διαλυτικό – αφαιρέτη ή γαλακτωματοποιητή, χωρίς να κατακάθεται το χρώμα.

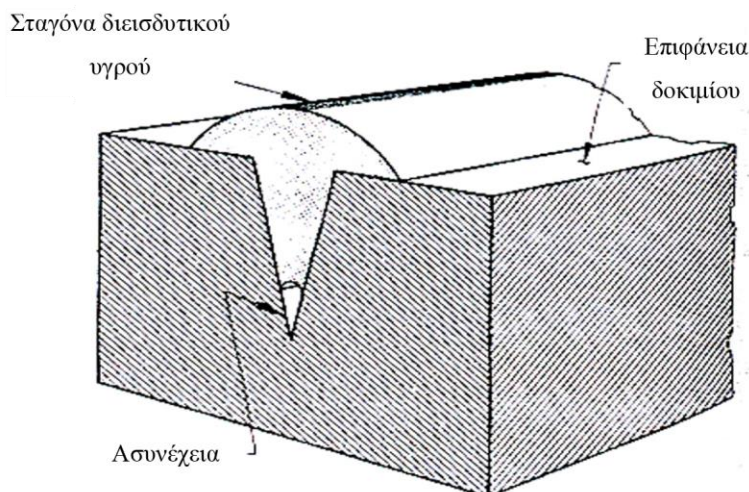
Όσο σημαντικό είναι το να εισέλθει το υγρό στην επιφανειακή ατέλεια, το ίδιο σημαντικό είναι να συγκρατηθεί μέσα εκεί και να αναδυθεί μετά από την απομάκρυνση του εξωτερικού στρώματος και την επίδραση, στη συνέχεια, του διαλύτη ανάπτυξης. Αυτό συμβαίνει διότι μόλις η επιφάνεια ελευθερωθεί από το περιττό υγρό καθίσταται προσβάσιμη για το παγιδευμένο υγρό, το οποίο υπό την επίδραση των δυνάμεων συνοχής απλώνεται στην καθαρή επιφάνεια μέχρι να επέλθει κάποια ισορροπία. Η εικόνα που παρατηρείται τότε φαίνεται στο **Σχήμα 3.48**.



Σχήμα 3.46 Ανύψωση ή ταπείνωση, σε μικρούς κάθετους τριχοειδείς σωλήνες, που καθορίζεται από τη γωνία επαφής μεταξύ ενός υγρού και του τοιχώματος του τριχοειδούς σωλήνα. (a) Όταν $\theta < 90^\circ$, συμβαίνει τριχοειδής ανύψωση. (c) Όταν $\theta > 90^\circ$, συμβαίνει τριχοειδής ταπείνωση. (b) Όταν $\theta = 90^\circ$, δεν συμβαίνει τίποτα από τα δύο.

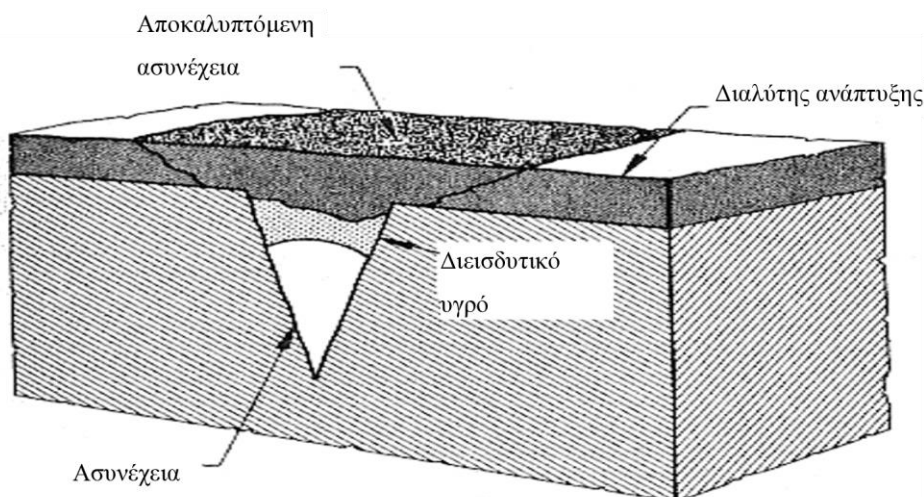


Σχήμα 3.47 Αναπαράσταση των δυνάμεων που εμφανίζονται στην τριχοειδή ανύψωση: Η δύναμη του βάρους του υγρού (F_d) και η δύναμη από την επιφανειακή τάση (F_u), κατά μήκος της περιμέτρου του μηνίσκου.



Σχήμα 3.48 Σχηματισμένη σταγόνα του διεισδυτικού υγρού μετά την απομάκρυνση μερικής ποσότητάς του από την επιφάνεια του δοκιμίου. Το εναπομείναν διεισδυτικό υγρό φανερώνει αρχικά την ύπαρξη ασυνέχειας.

Αν και σε μερικές περιπτώσεις το ποσό του διεισδυτικού υγρού είναι αρκετό, ώστε να γίνει η ανίχνευση με το μάτι, η ευαισθησία αυξάνεται δραματικά με τη χρήση του διαλύτη ανάπτυξης. Μόλις απλώνεται ο διαλύτης ανάπτυξης, σχηματίζει επιφανειακό στρώμα που μοιάζει με σφουγγάρι και περιέχει λεπτά τριχοειδή μονοπάτια σε τυχαία διάταξη. Αν ο διαλύτης ανάπτυξης είναι σωστά σχεδιασμένος, τότε προσροφά το υγρό από την ατέλεια. Το διεισδυτικό υγρό συνεχίζει να μεταναστεύει υπό την τριχοειδή δράση και εξαπλώνεται μέσα στον διαλύτη ανάπτυξης, ώσπου να επέλθει κάποια ισορροπία. Η ορατότητα, πλέον, του διεισδυτικού υγρού μέσα στην ατέλεια αυξάνεται αρκετά, κάτι που εικονίζεται στο **Σχήμα 3.49**.



Σχήμα 3.49 Τομή όπου φαίνεται η αλληλεπίδραση του διεισδυτικού υγρού και του διαλύτη ανάπτυξης.

3.9.3.2 Μέθοδοι

Εξαιτίας των μεγάλων διαφορών στις εφαρμογές της εξέτασης με διεισδυτικά υγρά, ήταν απαραίτητο να αναπτυχθούν δύο τύποι υγρών (τύπος Ι, το φθορίζον, τύπος ΙΙ, το ορατό) και τέσσερις βασικές μέθοδοι ώστε να περιληφθούν οι διακυμάνσεις στους ακόλουθους παράγοντες:

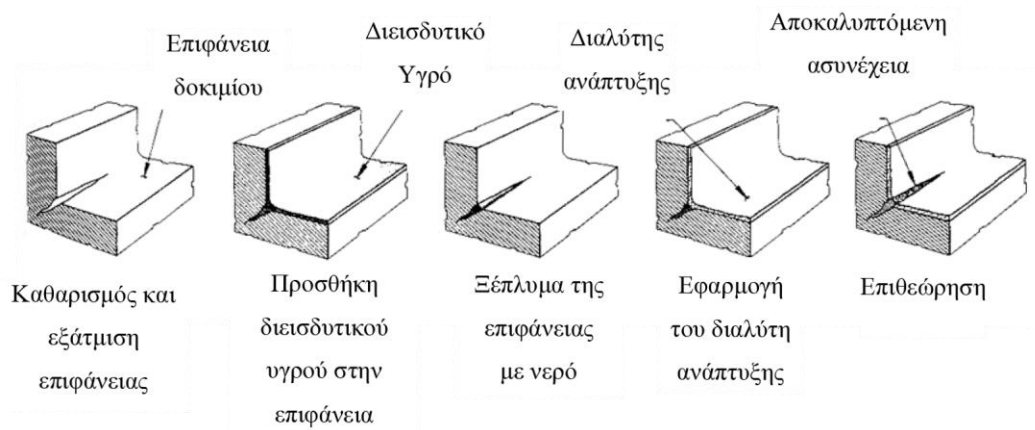
- κατάσταση της επιφάνειας τού υπό εξέταση αντικειμένου,

- χαρακτηριστικό των ατελειών που επιθυμούμε να ανιχνεύσουμε,
- χρόνος και χώρος της δοκιμής,
- μέγεθος του αντικειμένου,
- επιθυμητή ευαισθησία.

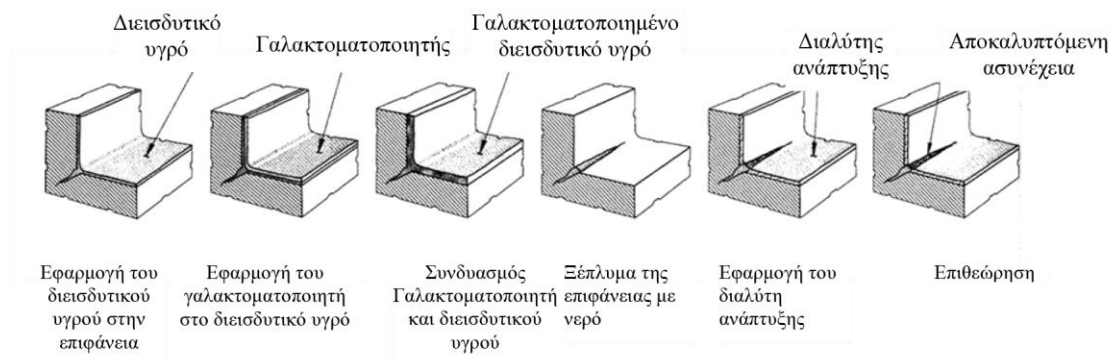
Έτσι, λοιπόν, οι τέσσερις μέθοδοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Μέθοδος Α: Διεισδυτικό υγρό που απομακρύνεται με νερό
Αυτή η μέθοδος είναι σχεδιασμένη ώστε να μην χρειάζεται να μεσολαβήσει το στάδιο του γαλακτωματοποιητή, αλλά το διεισδυτικό απομακρύνεται με νερό. Χρησιμοποιείται για γρήγορη και αποτελεσματική διεργασία, όμως απαιτεί προσοχή διότι το υπερβολικό ξέπλυμα απομακρύνει όλο το υγρό. Η μέθοδος και τα στάδιά της παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.50**.
- Μέθοδος Β και D: Διεισδυτικά υγρά που γαλακτωματοποιούνται
Αυτά είναι σχεδιασμένα να ανιχνεύουν πολύ μικρές ατέλειες σε ορισμένα υλικά, και δεν εκπλένονται κατευθείαν με νερό. Η διαφορά με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι πριν την τελευταία πλύση επιδρά ένας γαλακτωματοποιητής ο οποίος καθιστά το παραμένον διεισδυτικό υγρό υδατοδιαλυτό. Χρειάζεται, ωστόσο, προσοχή και έλεγχος στον χρόνο δράσης του, ώστε να μην διαλυτοποιηθεί όλο το διεισδυτικό υγρό και μέσα στις ατέλειες. Στα **Σχήματα 3.51** και **3.52** παρατίθενται τα στάδια τόσο για τα λιποφιλικά συστήματα και για τα υδρόφιλα αντίστοιχα.
- Μέθοδος C: Διεισδυτικό υγρό που απομακρύνεται με διαλύτη
Χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητο να επιθεωρηθεί μόνο μια συγκεκριμένη περιοχή ενός αντικειμένου ή όταν η εξέταση πραγματοποιείται στην περιοχή εργασίας και όχι κατά την παραγωγή του. Κανονικά ο ίδιος διαλύτης χρειάζεται και για τον αρχικό καθαρισμό και για την απομάκρυνση του περιττού υγρού. Αν η διεξαγωγή της γίνει προσεκτικά, η μέθοδος C είναι η πιο ευαίσθητη. Η διεργασία αυτή εικονίζεται στο **Σχήμα 3.53**.

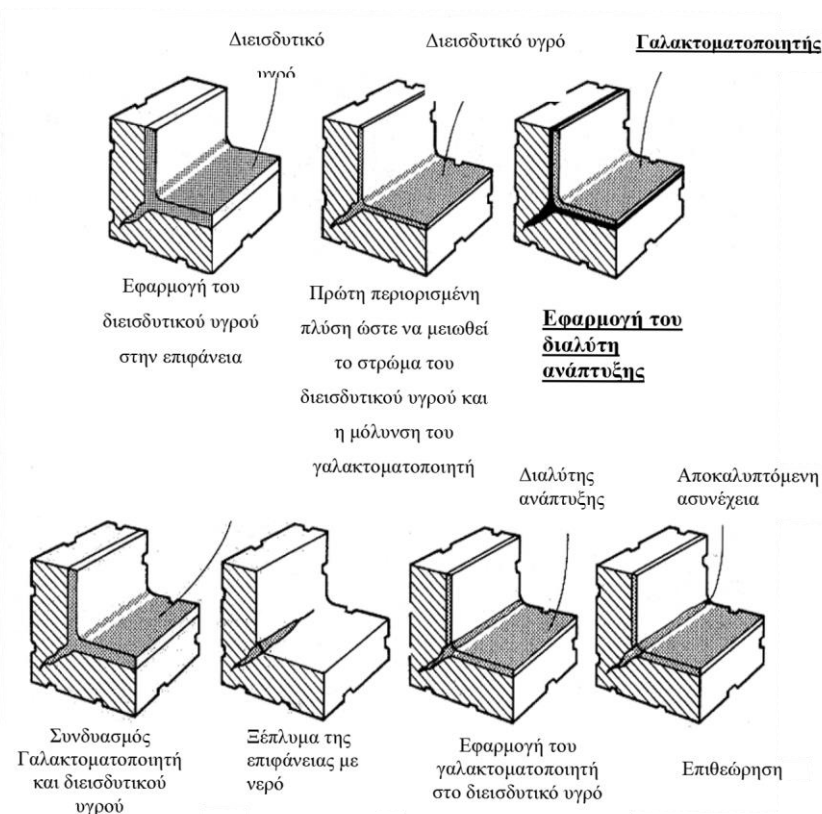
Ανεξάρτητα από ποια μέθοδο επιλέγεται, το μέγεθος και η ταχύτητα της απομάκρυνσης του περιττού διεισδυτικού υγρού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του προωθητικού ακροφυσίου, από τη θερμοκρασία και την πίεση του νερού, τη διάρκεια του κύκλου πλύσης, την κατάσταση της επιφάνειας του αντικειμένου και τα χαρακτηριστικά (φυσικά, χημικά) του διεισδυτικού υγρού.



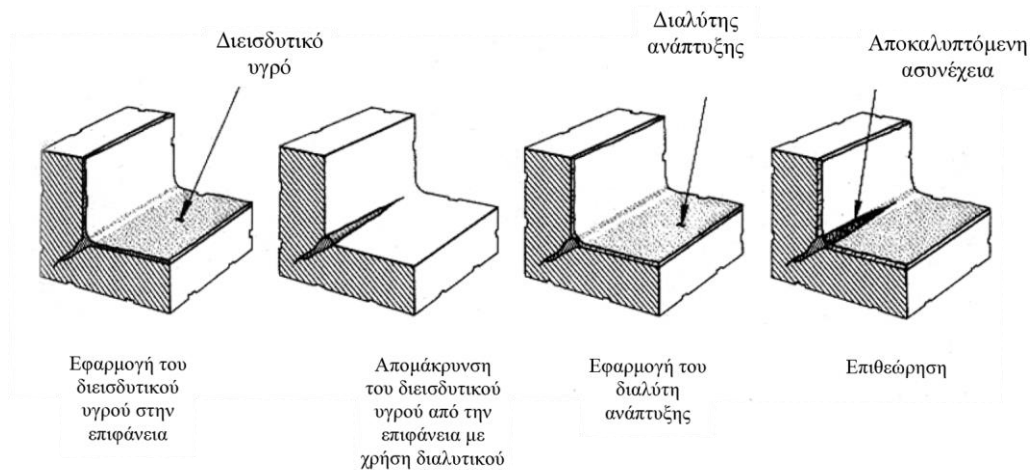
Σχήμα 3.50 Πέντε ουσιαστικά βήματα της επιθεώρησης με διεισδυτικά υγρά χρησιμοποιώντας το σύστημα μερικού καθαρισμού με νερό.



Σχήμα 3.51 Στάδια της μεθόδου β με χρήση λιποφιλικού διεισδυτικού υγρού.



Σχήμα 3.52 Στάδια μεθόδου D με χρήση υδροφιλικού διεσδυτικού υγρού.



Σχήμα 3.53 Στάδια του συστήματος διεσδυτικού υγρού που απομακρύνεται με μαγνήτη.

Περιγραφή της διαδικασίας

Ανεξάρτητα από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου διεσδυτικού υγρού, η διεργασία απαιτεί τουλάχιστον πέντε στάδια. Πρώτα από όλα επιβάλλεται ο καθαρισμός και το στέγνωμα της επιφάνειας είτε πρόκειται για συγκεκριμένο σημείο του αντικειμένου είτε για ολόκληρο. Οι ατέλειες που καταλήγουν στην επιφάνεια θα πρέπει να είναι απαλλαγμένες από λάδια, νερό ή άλλα μιάσματα.

Ακολουθεί το στάδιο της διεύδυσης, όπου το υγρό απλώνεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματίσει ένα φιλμ πάνω στην επιφάνεια. Αυτό το φιλμ πρέπει να μείνει αρκετό

χρόνο πάνω στην επιφάνεια, για να επιτευχθεί η μέγιστη διείσδυση σε κάθε παρούσα επιφανειακή ασυνέχεια.

Το επόμενο βήμα είναι αυτό της απομάκρυνσης του περιττού διεισδυτικού υγρού από την επιφάνεια. Η μέθοδος εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο διεισδυτικό υγρό. Είναι απαραίτητη η ομοιόμορφη απομάκρυνση, για την αποτελεσματικότερη επιθεώρηση, όμως, υπερβολική απομάκρυνση πρέπει να αποφεύγεται.

Στη συνέχεια έχει σειρά το στάδιο της ανάπτυξης. Ανάλογα με το είδος του υλικού ανάπτυξης, το αντικείμενο στεγνώνει πριν ή ακριβώς μετά από την επίδραση του υλικού αυτού, το οποίο και σχηματίζει ένα φιλμ πάνω στην επιφάνεια.

Τέλος, και μετά από χρονικό διάστημα που δίνεται ώστε να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη, η επιφάνεια εξετάζεται οπτικά σε κατάλληλο περιβάλλον. Η εξέταση λαμβάνει χώρα σε λευκό φως. Όταν χρησιμοποιείται φθορίζον υλικό, η επιθεώρηση πραγματοποιείται σε κατάλληλη σκοτεινή περιοχή με τη βοήθεια υπεριώδους φωτός.

3.10 Ηλεκτρονικές μη καταστροφικές δοκιμές

3.10.1 Δοκιμή με Μαγνητικά Πεδία

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κάποιες από τις παλιότερες και πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Οι δυνατότητές τους μέχρι πριν από λίγα χρόνια περιορίζονταν στην εξέταση των μαγνητικών υλικών σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό ατελειών όπως ρωγμές, κενά ή ακαθαρσίες ξένων μετάλλων. Εδώ και μερικά χρόνια έχουν αναπτυχθεί μαγνητικές μέθοδοι για την εκτίμηση του μεγέθους των κόκκων, τη σύνθεση και τη σκληρότητα των υλικών.

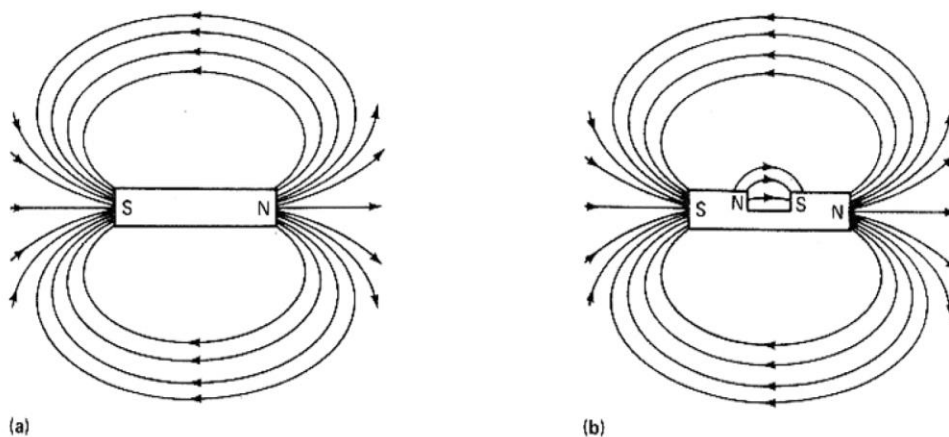
Όλες οι μαγνητικές μέθοδοι ανίχνευσης ατελειών λειτουργούν ουσιαστικά μετρώντας την απώλεια της μαγνητικής ροής κοντά στην επιφάνεια του υλικού εξαιτίας της παρουσίας της ατέλειας (ελαττώματος).

3.10.1.1 Αρχές που διέπουν τη δοκιμή της απώλειας μαγνητικής ροής

Προέλευση των πεδίων απώλειας ενός ελαττώματος

Στο **Σχήμα 3.54 (a)** φαίνεται μια ομοιόμορφα μαγνητισμένη ράβδος. Η ράβδος αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό στοιχειωδών μαγνητών ευθυγραμμισμένων με τη διεύθυνση της μαγνήτισης. Στο εσωτερικό του υλικού κάθε μαγνητικός πόλος αντισταθμίζεται από την παρουσία ενός αντίθετου πόλου που σημαίνει ότι οι εσωτερικοί πόλοι δεν συνεισφέρουν στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, στην επιφάνεια οι μαγνητικοί πόλοι δεν αντισταθμίζονται και γι' αυτό παράγουν μαγνητικό πεδίο γύρω από το αντικείμενο.

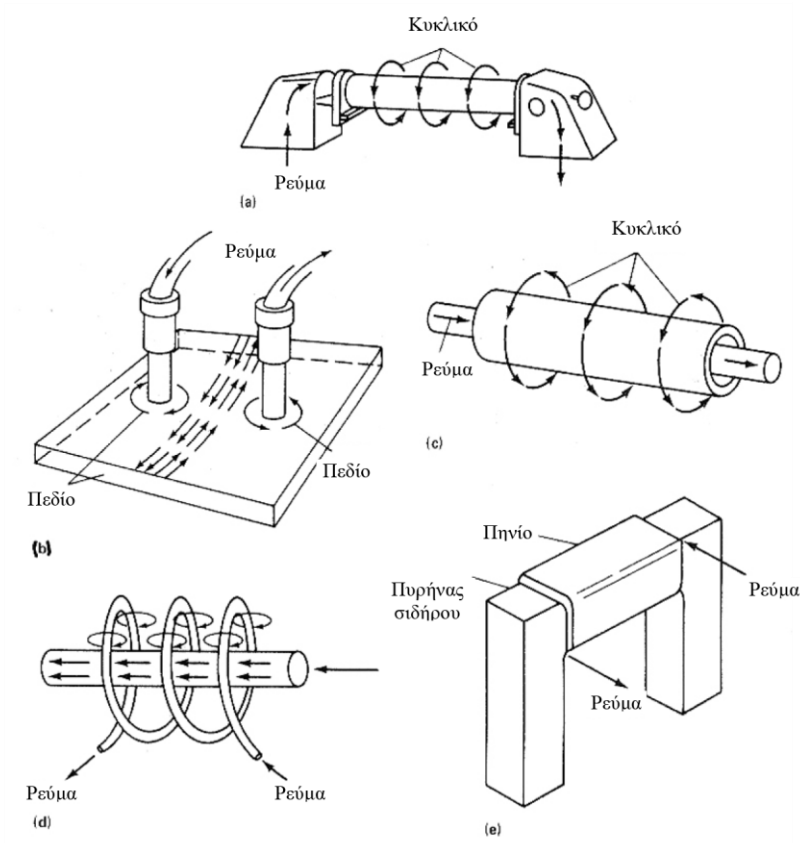
Στην περίπτωση που κοπεί μια μικρή λωρίδα στην επιφάνεια της ράβδου **Σχήμα 3.54 (b)**, τότε δημιουργούνται αναντιστάθμητοι πόλοι στην επιφάνειά της και τοπικό μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται στην περιοχή. Οι επιπλέον μαγνητικές γραμμές που συνδέονται με την παρουσία της αύλακας, όπως φαίνονται στο σχήμα, είναι αρκετές για την ποιοτική εξήγηση του φαινομένου, όμως δεν προσφέρουν ακριβή ποσοτική περιγραφή. Αυτό συμβαίνει διότι θεωρήσαμε ότι η μαγνήτιση παραμένει ομοιόμορφη στη ράβδο και μετά την εμφάνιση της ατέλειας, κάτι το οποίο δεν αληθεύει, διότι αλλάζει το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή γειτνιάσής του, και, κατ' επέκταση, η μαγνήτιση γύρω από αυτή. Οι δυνάμεις και οι προσανατολισμοί των στοιχειωδών διπόλων στην πραγματικότητα κυμαίνονται από σημείο σε σημείο και η συνεισφορά αυτή επιδρά στην απώλεια μαγνητικής ροής.



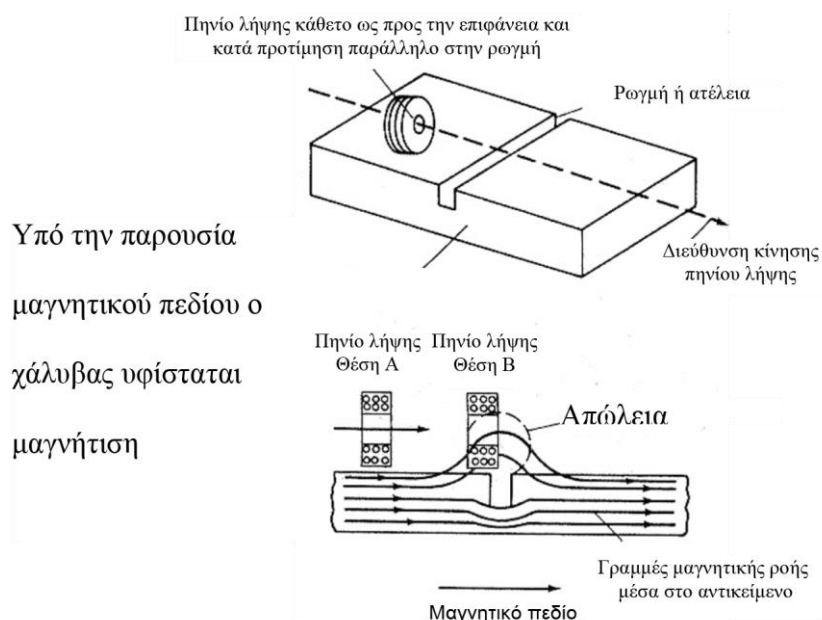
Σχήμα 3.54 Αρχή δημιουργίας εκτροπής μαγνητικού πεδίου. (a) Γραμμές μαγνητικής ροής μαγνήτη χωρίς ατέλεια. (b) Με επιφανειακή ατέλεια.

3.10.1.2 Πειραματικές τεχνικές

Προϋπόθεση για την πειραματική εφαρμογή είναι η δημιουργία ενός κατάλληλου μαγνητικού πεδίου μέσα στο υλικό. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο έλεγχος της δύναμης και της διεύθυνσης της μαγνήτισης βοηθάει στην ανίχνευση των ελαττωμάτων αλλά και στη διάκριση μεταξύ διαφορετικού τύπου ατελειών. Γενικά το μέγεθος και η διεύθυνση της μαγνήτισης θα πρέπει να διαλέγεται έτσι ώστε να προβάλλει όλες τις πιθανές ατέλειες, χωρίς να αποδυναμώνει τις μεγάλες ή να εκμηδενίζει τις μικρές. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της απώλειας της μαγνητικής ροής, σύμφωνα με τις άλλες πηγές που εμπλέκονται στο φαινόμενο, ώστε να αυξάνονται οι πιθανότητες ανίχνευσής της. Το μέγεθος καθορίζεται συνήθως μετά από πειράματα, ενώ η διεύθυνση θα πρέπει να είναι κάθετη στη μεγαλύτερη διάσταση της ατέλειας. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται με δύο τρόπους, άμεσα και έμμεσα. Στην άμεση μαγνήτιση περνάει το ρεύμα μέσα από το αντικείμενο, ενώ στην έμμεση μαγνήτιση αυτή δημιουργείται με την τοποθέτηση του αντικείμενου σε μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα παρακείμενο ηλεκτρικό αγωγό ή, συνηθέστερα, μόνιμο μαγνήτη. Τέτοιες μέθοδοι εικονίζονται στο **Σχήμα 3.55**. Η απώλεια της μαγνητικής ροής ανιχνεύεται από διάφορους τύπους αισθητήρων μαγνητικού πεδίου, εκ των οποίων οι πιο συνηθισμένοι είναι το επαγωγικό πηνίο και ο αισθητήρας Hall π.χ. **Σχήμα 3.56**.



Σχήμα 3.55 Μέθοδοι μαγνήτισης.



Σχήμα 3.56 Μέτρηση της εκτρεπόμενης μαγνητικής ροής χρησιμοποιώντας πηνίο λήψης.

Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια

Στην κατηγορία των δοκιμών μαγνητικού πεδίου υπόκειται και η εξέταση με τη βοήθεια μαγνητικών σωματιδίων. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό ασυνεχειών τόσο στην επιφάνεια όσο και σε κάποιο βάθος από αυτή σε φερρομαγνητικά υλικά. Στηρίζεται στην ίδια αρχή με τις υπόλοιπες μαγνητικές μεθόδους, δηλαδή στη διαρροή μαγνητικής ροής

που δημιουργείται από μια ατέλεια όταν το υλικό μαγνητίζεται. Η παρουσία της ανιχνεύεται με χρήση φερρομαγνητικών σωματιδίων πολύ μικρού μεγέθους που απλώνονται στην επιφάνεια και συγκεντρώνονται γύρω από την ατέλεια. Η συγκέντρωση των σωματιδίων δίνει πληροφορίες για τη θέση, το μέγεθος, τη μορφή και την έκταση της ατέλειας. Τα μαγνητικά σωματίδια μπορεί να βρίσκονται μέσα σε κάποιο υγρό μέσο συγκράτησης ή όχι.

Τύποι μαγνητικών πεδίων

Είναι σημαντικό να εξεταστούν κάποιες περιπτώσεις μαγνητικών πεδίων που εφαρμόζονται στη διεργασία της μεθόδου.

- Μαγνητικό δακτυλίδι

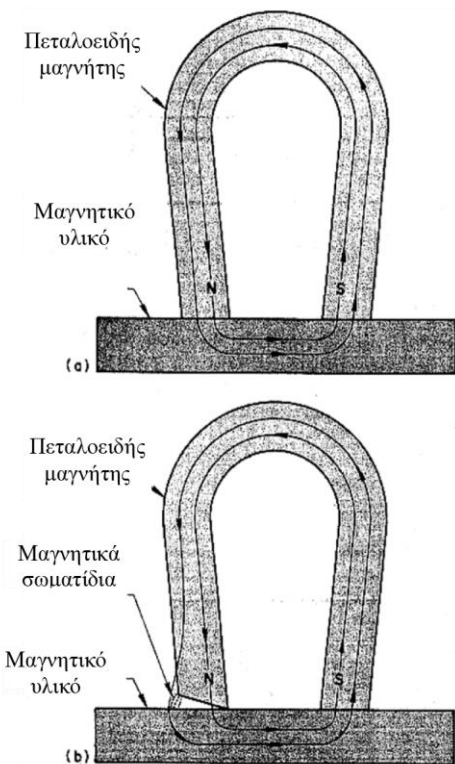
Όταν ένας πεταλοειδής μαγνήτης με τετράγωνα άκρα προσαρμόζεται σε ένα μαγνητικό υλικό σχηματίζοντας ένα κλειστό σύστημα οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται από τον βόρειο στο νότιο πόλο μέσω του υλικού. Επειδή δεν υπάρχουν εξωτερικοί πόλοι, οι δυναμικές γραμμές είναι περιορισμένες σε έναν χώρο κλειστό που μοιάζει με δακτυλίδι εμποδίζοντας τυχόν μαγνητικά σωματίδια να έλκονται από τον μαγνήτη. Αν όμως το τέλος του μαγνήτη δεν είναι τετράγωνο και υφίσταται κάποιος χώρος με αέρα μεταξύ αυτού και του υλικού, τότε μαγνητικά σωματίδια προσκολλώνται στους πόλους προσπαθώντας να γεφυρώσουν το κενό (**Σχήμα 3.57**). Κάθε ρωγμή δημιουργεί έναν νότιο και έναν βόρειο πόλο, και, κατά συνέπεια, έλκει τα σωματίδια. Αυτή η απλουστευτική άποψη, που είναι καταγεγραμμένη και στα πρότυπα εγχειρίδια των καταστροφικών δοκιμών, εξηγείται με βάση το γεγονός ότι η ύπαρξη ρωγμών ή ατελειών και, γενικά, μη μαγνητικών περιοχών σε ένα μαγνητικό κύκλωμα δημιουργεί τοπικές βαθμίδες πεδίου, που ελκύουν-εγκλωβίζουν τα μαγνητικά σωματίδια.

- Μαγνητική ράβδος

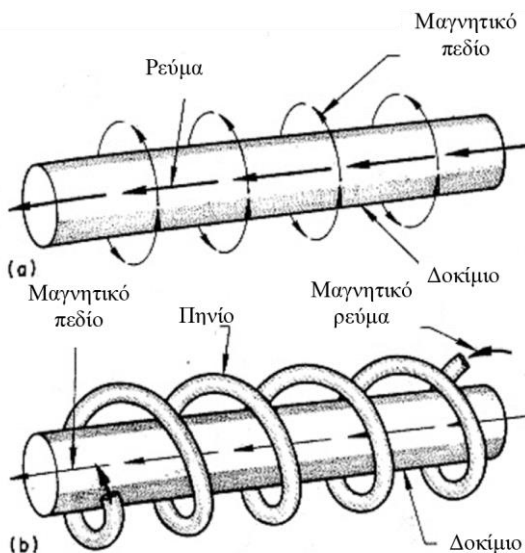
Δεν αναλύεται σε λεπτομέρεια.

- Κυκλική μαγνήτιση

Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από έναν ευθύ αγωγό, όπως ένα σύρμα ή μια ράβδος, δημιουργεί ένα κυκλικό μαγνητικό πεδίο γύρω του. Όταν ο αγωγός είναι φερρομαγνητικό υλικό το ρεύμα προκαλεί μαγνητικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο, εφαιπτομενικά του ρεύματος, όπως στο **Σχήμα 3.58 (α)**.



Σχήμα 3.57 (α) Πεταλοειδής μαγνήτης και μαγνητικό υλικό συνδεδεμένα ώστε να σχηματίζουν ένα κλειστό σύστημα, τύπου δακτυλιδιού, το οποίο δεν έλκει μαγνητικά σωματίδια. (β) Το ίδιο σύστημα με κενό αέρος, που έλκει μαγνητικά σωματίδια.



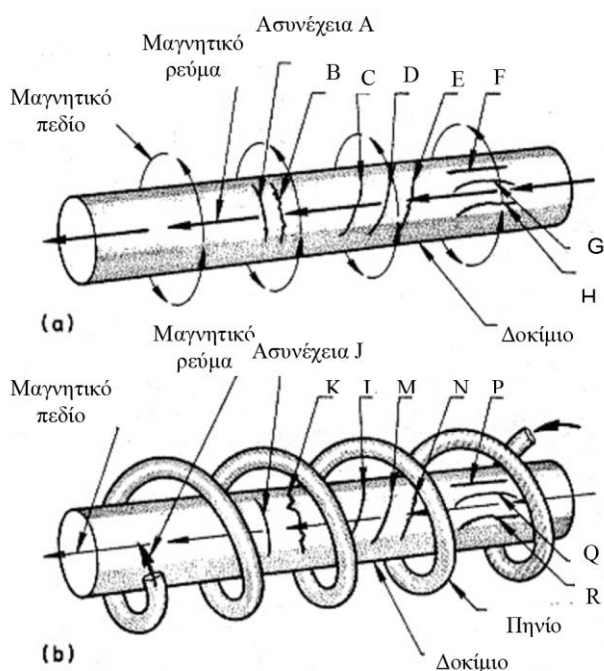
Σχήμα 3.58 Μαγνητισμένες μπάρες όπου φαίνεται η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. (α) κυκλικό, (β) διάμηκες.

- Διαμήκης μαγνήτιση
Το ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμεύει και στη δημιουργία διαμήκους μαγνητικού πεδίου στα μαγνητικά υλικά. Αυτό γίνεται αν το ρεύμα περάσει μέσα από πηνίο μίας ή περισσότερων σπειρών, οπότε και το πεδίο υφίσταται στο εσωτερικό του όπως δείχνεται στο **Σχήμα 3.59 (b)**.
- Επίδραση της κατεύθυνσης της ροής

Για να παρατηρηθεί μια ασυνέχεια θα πρέπει η γωνία που σχηματίζεται από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου και από τη διεύθυνση της ατέλειας να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε οι μαγνητικές γραμμές να γεφυρώνουν το κενό και όχι να το προσπερνούν. Τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται αν η γωνία είναι 90° .

Στο **Σχήμα 3.59 (a)** εικονίζεται η περίπτωση της κυκλικής μαγνήτισης. Σ' αυτό το επιβαλλόμενο πεδίο κάτω από κανονικές συνθήκες η ασυνέχεια A δεν θα παρατηρηθεί, επειδή το σχήμα της είναι παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές. Αν, όμως, η ασυνέχεια είναι παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο, αλλά έχει λίγο ακανόνιστο σχήμα, όπως η B, υπάρχει η πιθανότητα να δώσει μια αδύναμη ένδειξη. Αν η ατέλεια σχηματίζει γωνία σχεδόν 45° με το μαγνητικό πεδίο, όπως η C, D, E, τότε οι συνθήκες παρατήρησης είναι περισσότερο ευνοϊκές ανεξάρτητα από τη μορφή τους. Ασυνέπειες που βρίσκονται σε γωνία 90° ως προς το πεδίο, όπως οι (F, G, H), παράγουν τις πιο έντονες ενδείξεις.

Αντίστοιχα και στην περίπτωση της διαμήκουσ μαγνήτισης [**Σχήμα 3.59 (b)**], οι ασυνέχειες L, M, N, που βρίσκονται σε γωνία περίπου 45° , δίνουν σχετικά ανιχνεύσιμες ενδείξεις, οι K, J παράγουν την πιο έντονη ένδειξη, ενώ οι P, Q, και R ανιχνεύονται δύσκολα ή καθόλου.



Σχήμα 3.59 Επίδραση της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου στην ανιχνευσιμότητα των ασυνεχειών. (a) κυκλική μαγνήτιση, (b) διαμήκης μαγνήτιση.

Πλεονεκτήματα – Περιορισμοί

Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων είναι πολύ ευαίσθητη στον εντοπισμό μικρών και ρηχών επιφανειακών ρωγμών στα φερρομαγνητικά υλικά. Επίσης, ανιχνεύονται και ασυνέχειες που δεν βγαίνουν στην επιφάνεια, αν και υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί σ' αυτήν την περίπτωση. Αν μια ατέλεια είναι έντονη και όχι επιφανειακή, όπως μια λωρίδα από μη μεταλλικά εγκλείσματα, είναι δυνατόν να παράγει δυνατή ένδειξη. Αν η ατέλεια βρίσκεται βαθύτερα, τότε η ένδειξη θα είναι περισσότερο αδύνατη.

Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου φαίνονται κατευθείαν στην επιφάνεια του αντικειμένου όπου και δημιουργείται κάτι σαν φωτογραφία της ατέλειας. Οι έμπειροι τεχνικοί καταλήγουν πολλές φορές σε λογικά συμπεράσματα του βάθους της ρωγμής, με χρήση βέβαια του κατάλληλου υλικού (μαγνητικά σωματίδια, και υγρό που τα περιέχει). Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχουν μεγάλοι περιορισμοί ως προς το μέγεθος ή το σχήμα του προς επιθεώρηση κομματιού. Δεν χρειάζεται, επίσης, διαδικασία προκαθορισμού, και εντοπίζονται ακόμη και ρωγμές που είναι γεμάτες με ξένο υλικό.

Ωστόσο, ορισμένοι περιορισμοί πρέπει να τυγχάνουν ιδιαίτερης προσοχής. Για παράδειγμα, τα λεπτά επιστρώματα μπογιάς ή άλλου μη μαγνητικού υλικού επηρεάζουν την ευαισθησία της μεθόδου. Επίσης:

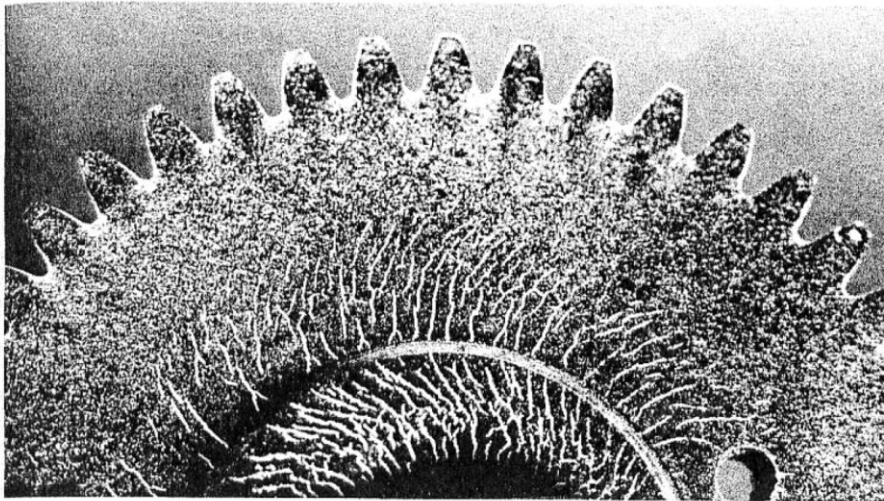
- Η μέθοδος εφαρμόζεται αποκλειστικά στα φερρομαγνητικά υλικά.
- Καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν το μαγνητικό πεδίο έχει τέτοια διεύθυνση ώστε να κόβει το κύριο επίπεδο της ασυνέχειας. Αυτό πολλές φορές απαιτεί δύο ή περισσότερες διαδοχικές δοκιμές με διαφορετικό προσανατολισμό και τιμές μαγνήτισης.
- Χρειάζεται συχνά απομαγνήτιση μετά τη δοκιμή ή ακόμα και καθαρισμός από τα σωματίδια.
- Για μεγάλα αντικείμενα απαιτείται μεγάλη τιμή ρεύματος.
- Προσοχή επιβάλλεται ώστε να μην προκληθεί τοπική υπερθέρμανση ή κάψιμο στις περιοχές της ηλεκτρικής επαφής.

3.10.2 Μέθοδος Εκτροπής Ηλεκτρικού Ρεύματος (ECP)

Πρόκειται για μια μη καταστροφική μέθοδο ελέγχου που ανιχνεύει και χαρακτηρίζει ατέλειες σε μη φερρομαγνητικά αγωγίμα υλικά. Εργαστηριακές δοκιμές έχουν εντοπίσει πολύ μικρές ατέλειες στην επιφάνεια και κάτω από αυτή, σε μέταλλα υψηλής και χαμηλής αγωγιμότητας. Έχει προκύψει επίσης ότι το εύρος του ηλεκτρικού σήματος εξόδου της μεθόδου έχει γραμμική σχέση με τη μετωπική περιοχή της ρωγμής, ενώ άλλη αντίστοιχη σχέση συνδέει το μήκος της ρωγμής με την απόσταση από κορυφή σε κορυφή.

3.10.2.1 Αρχή της μεθόδου

Η αρχή που διέπει τη συγκεκριμένη μέθοδο εικονίζεται στο **Σχήμα 3.61**. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα πυκνότητας J_0 διαρρέει την προς εξέταση περιοχή παράγοντας μαγνητική ροή πυκνότητας B_0 . Μια ατέλεια προκαλεί την εκτροπή του ρεύματος και, κατά συνέπεια, επέρχεται μεταβολή και στην τιμή της μαγνητικής ροής γύρω από αυτή, που αλλάζει κατά μια ποσότητα ΔB . Η ανίχνευση αυτής της μεταβολής του B γίνεται με τη βοήθεια ενός συστήματος αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Τα αισθητήρια πηνία είναι προσανατολισμένα ώστε να ανιχνεύουν τη συνιστώσα της μαγνητικής ροής στον άξονα των x .

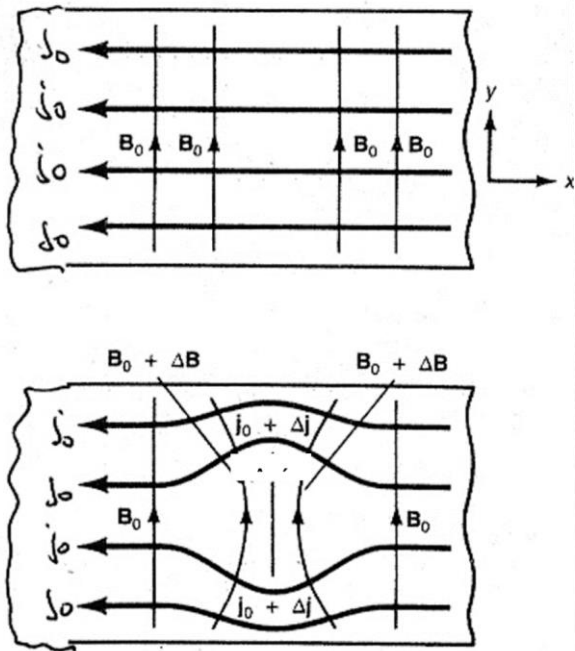


Σχήμα 3.60 Γρανάζι διαμέτρου 50mm που ελέγχθηκε με διεισδυτικά υγρά. Αναδείχθηκαν ρωγμές μήκους 0,25mm και πλάτους 0,1mm.

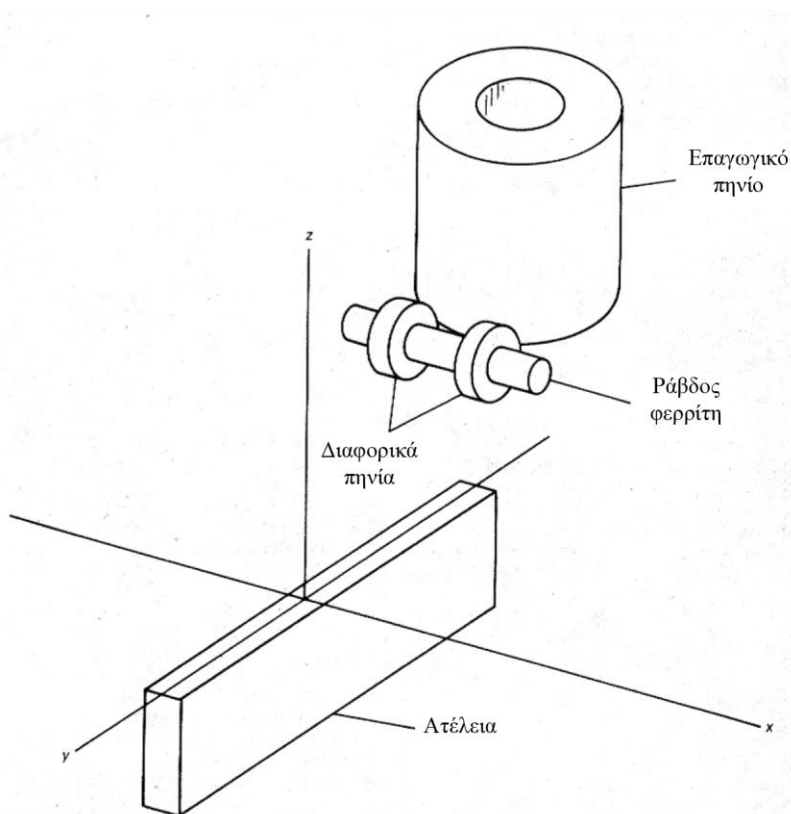
Σε μερικές εφαρμογές της μεθόδου γίνεται χρήση ενός επαγωγικού πηνίου, παρόμοιου με εκείνο που χρησιμοποιείται και στη μέθοδο των δινορευμάτων, ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη πυκνότητα ρεύματος στην προς μέτρηση περιοχή. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις μεθόδους των δινορευμάτων, η παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος με τη βοήθεια πηνίου δεν είναι ουσιαστικά χρήσιμη. Πειράματα έχουν δείξει ότι η διέγερση με συνεχές ρεύμα δίνει εξίσου καλά, και, μερικές φορές, καλύτερα αποτελέσματα από τη διέγερση με εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, χρησιμοποιείται αισθητήρας Hall για τη λήψη του σήματος.

Μια άλλη διαφορά μεταξύ ECP και συμβατικών μεθόδων δινορευμάτων έγκειται στον προσανατολισμό του αισθητήρα. Το πηνίο διεγέρτης και το πηνίο λήψης είναι μεταξύ τους τοποθετημένα κάθετα (**Σχήμα 3.62**), γεγονός το οποίο μειώνει τη σύζευξη των πηνίων στην περίπτωση απουσίας ατελειών.

Επίσης, η χρήση διαφορικών αισθητήρων τείνει να αναιρέσει την επίπτωση της παραμένουσας σύζευξης. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν την καλύτερη διέγερση και προσδίδουν στη μέθοδο ECP μεγάλη ευαισθησία. Σημαντική είναι και η μείωση της σύζευξης μεταξύ ανιχνευτή και επιφανείας, επιτρέποντας έτσι σχετική μετατόπιση της συσκευής χωρίς την παραγωγή θορύβου που εμποδίζει την ανίχνευση μικρών ατελειών.



Σχήμα 3.61 Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, J , και η αντίστοιχη πυκνότητα μαγνητικής ροής, B . (α) Χωρίς επιφανειακή ατέλεια. (β) Με επιφανειακή ατέλεια κάθετη στη ροή του ρεύματος.

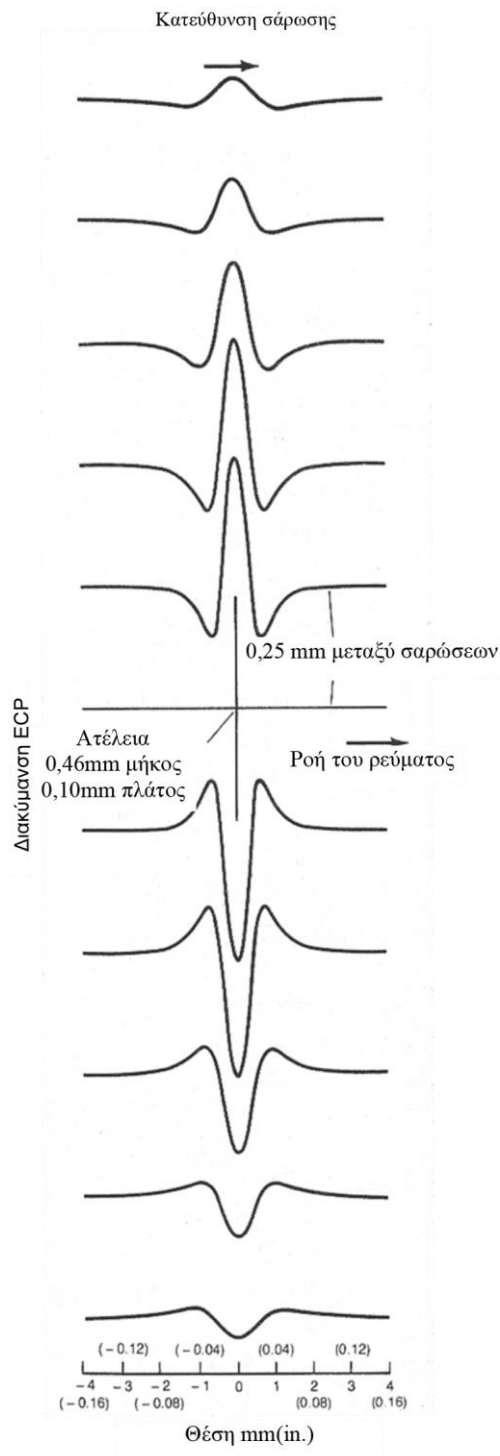


Σχήμα 3.62 Πειραματική διάταξη της μεθόδου ECP. Η διαφορά στο μέγεθος του πηνίου διέγερσης και του πηνίου λήψης είναι μεγαλύτερη στην πραγματικότητα.

Το κόστος για τα παραπάνω είναι ότι τα αισθητήρια πηνία μετρούν συγκεκριμένες διευθύνσεις εκτροπής ρεύματος και αγνοούν άλλες.

Άλλη μία διαφορά μεταξύ των μεθόδων ECP και δινορευμάτων αφορά τη συχνότητα με την οποία εφαρμόζεται. Στην ECP είναι αρκετά μικρότερη και αυτό διότι, στην περίπτωση αισθητήρων δινορευμάτων, πρέπει να μειωθεί ο θόρυβος από τυχαίες μετατοπίσεις, κάτι που επιτυγχάνεται με τις υψηλές συχνότητες οι οποίες επιτρέπουν τον διαχωρισμό του σήματος που προέρχεται από τις μετατοπίσεις με τα σήματα που προέρχονται από τις ατέλειες. Η μέθοδος ECP λειτουργεί σε συχνότητες κάτω από 100KHz.

Στο **Σχήμα 3.63** φαίνονται τα σήματα τα οποία λαμβάνονται από μια σάρωση που είναι κάθετη στην ατέλεια και αφορά διάσταση 0,46mm μήκος και 0,10mm βάθος.



Σχήμα 3.63 Σήματα λήψης της μεθόδου ECP για σάρωση κάθετη σε ρωγμή μήκους 0,46 mm και βάθους 0,1 mm.

3.10.3 Επιθεώρηση με Δινореύματα (Eddy Currents)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ή τον διαχωρισμό ανάμεσα σε φυσικές, δομικές ή μεταλλουργικές καταστάσεις σε ηλεκτρικά αγώγιμα φερρομαγνητικά ή μη φερρομαγνητικά μέταλλα και σε μεταλλικά μέρη.

Πιο αναλυτικά, με τη χρήση δινореυμάτων επιτυγχάνεται:

- η μέτρηση ιδιοτήτων όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα, το μέγεθος κόκκου, η κατάσταση θερμικής κατεργασίας, η σκληρότητα και οι φυσικές διαστάσεις,
- η ανίχνευση αρμών, ρωγμών, κενών, επικαλύψεων και εγκλεισμάτων,
- η ταξινόμηση ανόμοιων μετάλλων και ο εντοπισμός διαφορών στη σύνθεσή τους, στη μικροδομή τους και σε άλλες ιδιότητες,
- η μέτρηση του πάχους ενός μη αγωγίμου επιστρώματος σε ένα αγωγίμο μέταλλο ή ενός μη μαγνητικού μετάλλου σε ένα μαγνητικό μέταλλο.

Λόγω της αρχής δημιουργίας των δινορευμάτων, που είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, δεν είναι απαραίτητη η άμεση ηλεκτρική επαφή με το προς εξέταση αντικείμενο. Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί επιθεώρηση υψηλής ταχύτητας. Τέλος, δεδομένου ότι η μέθοδος βασίζεται σε έμμεση μέτρηση, η σχέση μεταξύ των ενδείξεων της συσκευής και των δομικών χαρακτηριστικών των υπό εξέταση αντικειμένων θα πρέπει να βεβαιώνεται συνεχώς και προσεκτικά.

3.10.3.1 Αρχές λειτουργίας

Η αρχή της μεθόδου ελέγχου στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής για τη δημιουργία δινορευμάτων σε ένα αντικείμενο που τοποθετείται μέσα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συνήθως με τη χρήση επαγωγικών πηνίων. Το σύστημα λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας λόγω θέρμανσης αλλά, κυρίως, οι θερμοκρασιακές αλλαγές. Οι αλλαγές στην ηλεκτρική φόρτωση τού υπό χαρακτηρισμό υλικού, που οφείλονται σε ατέλειες ή διαστασιακές αλλαγές, λαμβάνονται επαγωγικά και μεταφέρονται με ηλεκτρονικό κύκλωμα δίνοντας κάποιο σήμα εξόδου. Η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από το επιδερμικό φαινόμενο το οποίο συγκεντρώνει τα δημιουργούμενα δινορεύματα στην επιφάνεια κοντά στο πηνίο. Το επιθυμητό βάθος μέτρησης κάθε υλικού καθορίζεται από τη συχνότητα επαγωγικής διέγερσης, δεδομένου ότι τα δινορεύματα δημιουργούνται σε ένα βάθος δ που δίνεται από

$$\text{τον τύπο } \delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \omega \mu}} .$$

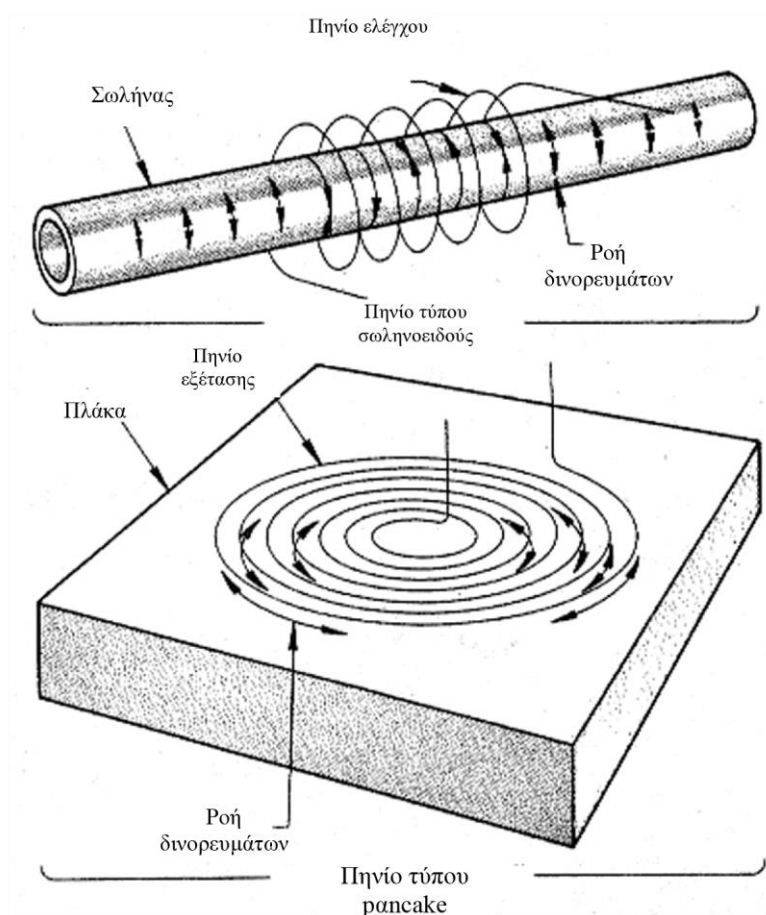
3.10.3.2 Μέθοδοι μέτρησης

Το προς εξέταση τμήμα τοποθετείται μέσα ή δίπλα σε ένα πηνίο που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα (**Σχήμα 3.64**), το οποίο ονομάζεται ρεύμα διέγερσης και δημιουργεί δινορεύματα στο προς χαρακτηρισμό αντικείμενο. Τα ρεύματα αυτά έχουν τέτοια φορά, ώστε να δημιουργούν μαγνητικό πεδίο που τείνει να αναιρέσει το αίτιο που τα προκαλεί. Ένα κύριο γνώρισμά τους είναι ότι ρέουν σε κλειστούς βρόχους, το δε μέγεθος και η φάση τους εξαρτώνται από:

- το αρχικό πεδίο διέγερσης που παρέχεται από τα πηνία διεγέρτες,
- τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αντικειμένου (σ και μ),
- τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα ρεύματα μέσα στο αντικείμενο.

Η ροή των δινορευμάτων μέσα στο αντικείμενο εξαρτάται από:

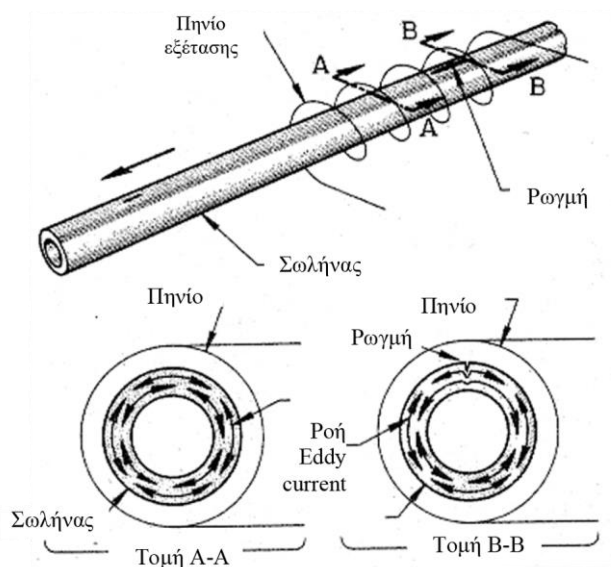
- τα ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού,
- την παρουσία ατελειών ή άλλων ασυνεχειών,
- το ολικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα στο αντικείμενο.



Σχήμα 3.64 Δύο τύποι πηνίων επιθεώρησης και η ροή των δινορευμάτων που δημιουργείται λόγω του ρεύματος διέγερσης σ' αυτά. Πηνία σωληνοειδούς τύπου εφαρμόζονται σε κυλινδρικά ή σωληνοειδή μέρη ενώ πηνία τύπου pancake σε επίπεδες επιφάνειες.

Η αλλαγή στη ροή των δινορευμάτων, λόγω παρουσίας μιας ρωγμής, εικονίζεται στο Σχήμα 3.65. Στη θέση A-A δεν υφίσταται ρωγμή και η ροή είναι συμμετρική. Στη θέση όμως B-B η ροή εμποδίζεται και αλλάζει κατεύθυνση με αποτέλεσμα να προκαλεί περαιτέρω αλλαγές στο δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, που ανιχνεύεται από το πηνίο ελέγχου. Η κατάσταση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί από τις επιπτώσεις που έχει το δευτερογενές πεδίο στην επαγόμενη τάση του πηνίου διέγερσης, αλλά κυρίως στο πηνίο ελέγχου που είναι τοποθετημένο κοντά στο αντικείμενο. Είναι δυνατόν να υπάρχουν και παραπάνω από ένα πηνία λήψης.

Οι ολοκληρωμένες μονάδες ποικίλλουν σε πολυπλοκότητα και εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της κάθε επιθεώρησης ξεχωριστά.



Σχήμα 3.65 Επίδραση μιας ρωγμής στη ροή των δινορευμάτων σε έναν σωλήνα.

3.10.3.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται χρήσιμη σε πολυάριθμες περιπτώσεις επιθεώρησης και δοκιμών, αρκεί οι φυσικές ιδιότητες του υπό εξέταση υλικού να είναι συμβατές με την αντίστοιχη τεχνική. Σε πολλές εφαρμογές, ωστόσο, η υπερβολική ευαισθησία στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι μειονέκτημα, κυρίως όταν μη σημαντικές παράμετροι για την αξιολόγηση του υλικού παράγουν σήματα που επικαλύπτουν ή μπερδεύονται με τα σήματα που ενδιαφέρουν.

3.10.4 Επιθεώρηση με ακουστική εκπομπή

Οι ακουστικές εκπομπές είναι κύματα που παράγονται από ξαφνική κίνηση σε υλικά υπό τάση. Οι κλασικές πηγές των ακουστικών εκπομπών είναι οι διεργασίες παραμόρφωσης, οι σχετικές με ατέλειες όπως η ανάπτυξη ρωγμών και η πλαστική παραμόρφωση. Απότομη κίνηση της πηγής παράγει ένα «τασικό» κύμα το οποίο εκτείνεται σε όλη τη δομή και διεγείρει έναν ευαίσθητο πιεζοηλεκτρικό μεταφορέα. Όσο η τάση στο υλικό αυξάνεται, πολλές τέτοιες εκπομπές δημιουργούνται. Τα σήματα καταγράφονται από έναν ή περισσότερους αισθητήρες και ενισχύονται, παράγοντας δεδομένα ικανά για επεξεργασία.

Η ακουστική εκπομπή διαφέρει από τις περισσότερες μεθόδους μη καταστροφικών δοκιμών από δύο απόψεις κυρίως. Πρώτον στο ότι το σήμα προέρχεται από το ίδιο το υλικό και όχι από εξωτερική πηγή. Δεύτερον ότι η ακουστική εκπομπή ανιχνεύει κίνηση ενώ οι περισσότερες μέθοδοι ανιχνεύουν υπάρχουσες γεωμετρικές ασυνέχειες.

Ένα τεράστιο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την επιθεώρηση μεγάλου μεγέθους αντικειμένων σε ένα στάδιο. Το μόνο που χρειάζεται είναι η σύνδεση κατάλληλου αριθμού αισθητήρων σε απόσταση συνήθως 1-6m μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει τη μέθοδο φθηνότερη και γρηγορότερη σε σχέση με άλλες. Ωστόσο, η ακουστική εκπομπή έχει σκοπό την αναγνώριση περιοχών με δομικά προβλήματα και, στη συνέχεια, άλλη μέθοδος εφαρμόζεται για την ταυτοποίηση και τη φύση των ατελειών.

Βέβαια, η εξέλιξη της μεθόδου έχει καταστήσει την επιβολή εξωτερικής τάσης εντελώς περιττή και τα ακουστικά κύματα δημιουργούνται.

3.10.5 Επιθεώρηση με Υπέρηχους

Αποτελεί μια μέθοδο κατά την οποία ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας εισέρχονται στο υλικό για την ανίχνευση επιφανειακών και εσωτερικών ατελειών. Τα ηχητικά κύματα, καθώς ταξιδεύουν μέσα στο υλικό, χάνουν ποσά ενέργειάς τους και ανακλώνται στις διεπιφάνειες. Η ανακλώμενη ακτίνα συλλέγεται και αναλύεται ώστε να προσδιοριστεί η παρουσία και η θέση μιας ατέλειας ή ασυνέχειας.

Ο βαθμός της ανάκλασης εξαρτάται κατά πολύ από τη φυσική κατάσταση της διεπιφάνειας (interface) και λιγότερο από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Π.χ. τα ηχητικά κύματα ανακλώνται σχεδόν πλήρως σε διεπιφάνειες μετάλλου – αερίου και μερικώς σε διεπιφάνειες μετάλλου – υγρού ή μετάλλου – στερεού.

Ρωγμές, πολύ λεπτά στρώματα, κενά (shrinkage) από συστολή, κοιλότητες, πόροι, ρινίσματα, και άλλες ασυνέχειες, που αποτελούν επιφάνειες όπου τα μικροκύματα ανακλώνται, μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν. Εγκλείσματα και άλλες ανομοιογένειες προκαλούν μερική ανάκλαση και σκέδαση ή κάποιο άλλο φαινόμενο όταν εξετάζονται με μικροκύματα.

Οι περισσότερες συσκευές υπερήχων μετρούν ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- Ανάκλαση των κυμάτων από διεπιφάνειες που αποτελούν σύνορο υλικών ή ασυνεχειών μέσα σε ένα υλικό.
- Τον χρόνο της διάβασης του κύματος μέσα από το αντικείμενο από το σημείο εισόδου έως το σημείο εξόδου, δηλαδή τον μεταφορέα.
- Την εξασθένηση των κυμάτων λόγω απορρόφησης ή σκέδασης στο εσωτερικό του υλικού.
- Χαρακτηριστικά της φασματικής εκπομπής (spectral response) για το διαδιδόμενο και το ανακλώμενο σήμα.

Οι περισσότερες μετρήσεις με υπερήχους γίνονται στην περιοχή συχνοτήτων 0,1 – 25 MHz (πάνω από τις συχνότητες της ανθρώπινης ακοής που είναι από 20Hz έως 20KHz). Τα κύματα υπερήχων είναι μηχανικές ταλαντώσεις. Τα πλάτη των ταλαντώσεων στα μεταλλικά μέρη επιβάλλουν τάσεις μικρότερες του ορίου ελαστικότητας, αποκλείοντας έτσι μόνιμες επιπτώσεις. Εκτός από τον εντοπισμό ατελειών, τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται στη μέτρηση πάχους και διάβρωσης, στον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεσμού και στην παρατήρηση φυσικών ιδιοτήτων, δομής, μεγέθους, κόκκων και ελαστικών σταθερών.

3.10.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά των υπερηχητικών κυμάτων

Οι υπέρηχοι είναι μηχανικά κύματα σε αντίθεση με το φως ή τις ακτίνες X που αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία συνίστανται από ταλαντώσεις ατομικών ή μοριακών μερών μιας ουσίας γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και συμπεριφέρονται ακριβώς όπως και τα ακουστικά κύματα. Διαδίδονται σε ελαστικά υλικά που μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια, όχι όμως και στο κενό. Όπως και τα κύματα φωτός, οι υπέρηχοι ανακλώνται από επιφάνειες, διαθλώνται όταν διασχίζουν ένα σύνορο μεταξύ δύο ουσιών που έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές ταχύτητες ήχου, και περιθλώνται σε όρια ή γύρω από εμπόδια.

3.10.5.2 Αναλογία με τα κύματα στο νερό

Οι υπέρηχοι μπορούν συμβατικά να προσομοιαστούν με τη συμπεριφορά των κυμάτων που δημιουργούνται στο νερό αν πέσει σ' αυτό μια πέτρα. Τα κύματα που δημιουργούνται διαδίδονται ακτινικά και εμφανίζονται χαρακτηριστικές μορφές από όρη και κοιλάδες. Τα μόρια του νερού παραμένουν στη θέση τους και ταλαντώνονται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων είναι το μήκος κύματος. Ο αριθμός των κύκλων (η μετάβαση από μια κορυφή σε μια κοιλάδα και ξανά στην

επόμενη κορυφή) ανά μονάδα χρόνου είναι η συχνότητα του κύματος. Η ταχύτητα του κύματος και ο βαθμός με τον οποίο το πλάτος και η ενέργειά του μειώνεται, καθώς διαδίδεται, εξαρτώνται μόνο από το υλικό. Π.χ. αν μια πέτρα πέσει με μεγαλύτερη ενέργεια, τότε τα κύματα που θα παραχθούν θα έχουν μεγαλύτερο πλάτος, μήκος κύματος και ενέργεια, αλλά την ίδια ταχύτητα.

3.10.5.3 Διάδοση κύματος

Οι υπέρηχοι διαδίδονται μέχρι ένα ποσοστό σε κάθε ελαστικό μέσο. Όταν τα ατομικά ή μοριακά μέρη ενός μέσου απομακρυνθούν από τη θέση ισορροπίας τους, τότε αναπτύσσεται εσωτερική τάση ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία. Λόγω των ενδοατομικών αυτών δυνάμεων μεταξύ γειτονικών μονάδων, κάθε αλλαγή της θέσης προκαλεί ένα μηχανικό κύμα. Το πλάτος, και η ταχύτητα διαφέρουν για τα υγρά, τα στερεά και τα αέρια, λόγω της διαφορετικής απόστασης των σωματιδίων σε κάθε κατάσταση, οι οποίες επιδρούν με διαφορετικό μέτρο στην έλξη μεταξύ τους και τελικά στην ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Η σχέση ταχύτητας και συχνότητας είναι $V=f\lambda$, όπου V είναι η ταχύτητα (μέτρα ανά δευτερόλεπτο), f είναι η συχνότητα (σε Hertz) και λ είναι το μήκος κύματος (σε μέτρα ανά κύκλο).

Σε ό,τι αφορά τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται για τυχαίες διεγέρσεις με βάση την απομάκρυνση των ατόμων από τη θέση ισορροπίας, οι υπέρηχοι κατηγοριοποιούνται ως διαμήκη κύματα και εγκάρσια κύματα. Ακόμη, η συσχέτιση του μήκους κύματος και του μέσου διάδοσης τα διαχωρίζει σε επιφανειακά κύματα και κύματα Lamb.

3.10.5.4 Διαμήκη κύματα

Διαδίδονται μέσα στα υλικά σαν διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα όπου τα ατομικά μέρη που διαδίδουν το κύμα δονούνται προς τα εμπρός και προς τα πίσω ακολουθώντας τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ένα σχεδιάγραμμα του πλάτους της απομάκρυνσης σε συνάρτηση με την απόσταση της διάδοσης του κύματος μαζί με τα συνεπαγόμενα αραιώματα – κοιλάδες και πυκνώματα – όρη φαίνεται στο **Σχήμα 3.66**.

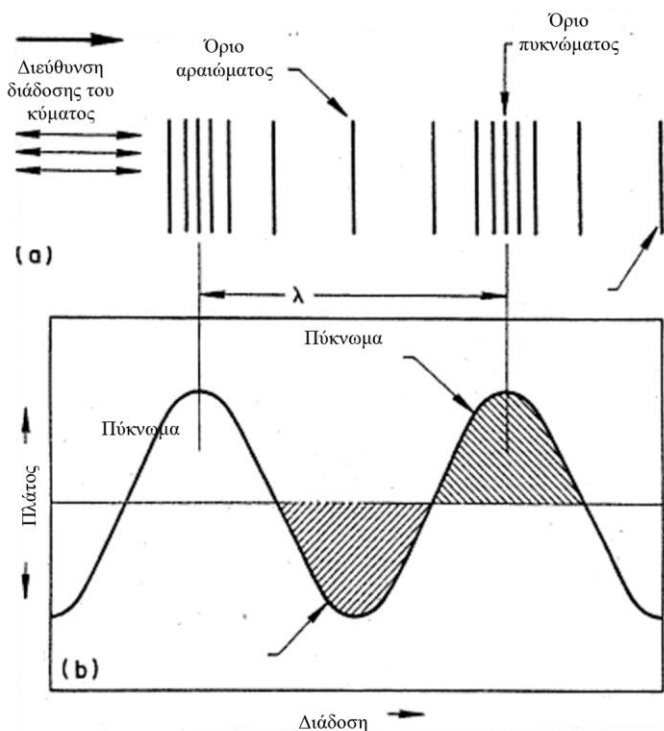
Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται εύκολα και γρήγορα στα υγρά και στα αέρια, όπως και στα ελαστικά στερεά. Ενδεικτικές ταχύτητες είναι 6000m/s στο χάλυβα, 1500m/s στο νερό και 330m/s στον αέρα.

3.10.5.5 Εγκάρσια κύματα

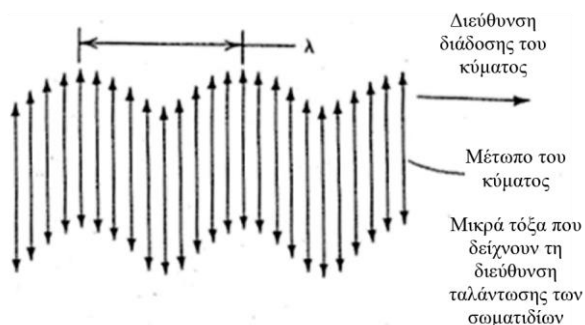
Τα κύματα αυτά αναπαρίστανται εύκολα με ένα σχοινί που ταλαντώνεται ρυθμικά έτσι ώστε το κάθε σημείο του δονείται και αυτό κάθετα στο επίπεδο διάδοσης του κύματος. Ένα τέτοιο κύμα εικονίζεται στο **Σχήμα 3.67**.

Σε αντίθεση με τα διαμήκη, τα εγκάρσια κύματα δεν μπορούν να υποστηριχθούν από τις ελαστικές συγκρούσεις γειτονικών ατομικών ή μοριακών μερών. Για τη διάδοσή τους είναι απαραίτητο κάθε μέρος να ασκεί σημαντική ελκτική δύναμη στα γειτονικά του και να τα συμπαρασύρει στην επαναλαμβανόμενη ανοδική και καθοδική του κίνηση. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων για το ίδιο υλικό είναι περίπου το 50% των διαμήκων. Στο νερό και στον αέρα είναι αδύνατο να υπάρξουν αυτού του είδους τα κύματα.

Ο συντονισμός των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων προκαλεί τα ψευτο-διαμήκη και ψευτο-εγκάρσια κύματα.



Σχήμα 3.66 Σχηματική αναπαράσταση διαμήκων κυμάτων των υπερήχων. (α) Ταλάντωση των σωματιδίων και δημιουργία αραιωμάτων και πυκνωμάτων. (β) Πλάτος της μετατόπισης των σωματιδίων ως προς τη θέση τους στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

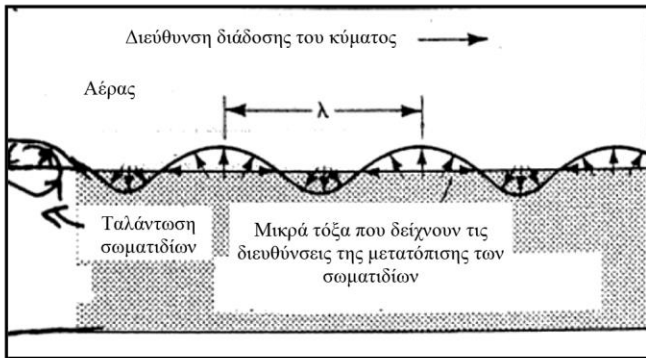


Σχήμα 3.67 Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιων κυμάτων.

3.10.5.6 Επιφανειακά κύματα

Αυτά τα κύματα ταξιδεύουν κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας σε στερεά μέρη τα οποία έχουν σχετικά μεγάλο πάχος. Για τη διάδοση αυτού του τύπου κύματος θα πρέπει αυτό να οδεύει κατά μήκος της επιφάνειας του κυματοδηγού, που θα χαρακτηρίζεται στη μια μεριά από τις ισχυρές ελαστικές δυνάμεις ενός στερεού και στην άλλη μεριά από τις πρακτικά αμελητέες ελαστικές δυνάμεις μεταξύ μορίων αερίου. Στην περίπτωση αυτή, το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου υπερήχου είναι πολύ μικρότερο των διαστάσεων (κυρίως του πάχους) του ακουστικού κυματοδηγού. Η ταχύτητά τους στο ίδιο υλικό φθάνει το 90% των διαμήκων κυμάτων, ενώ υφίστανται κι αυτά εξασθένηση μέσα στο υλικό. Η περιοχή που τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται με αρκετή ενέργεια δεν είναι μεγαλύτερη από ένα μήκος κύματος κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου. Σε αυτό το βάθος η ενέργεια του κύματος φθάνει το 4% της ενέργειας επιφάνειας και το πλάτος των ταλαντώσεων μειώνεται απότομα σε πολύ μικρές τιμές για μεγαλύτερο βάθος.

Τα επιφανειακά κύματα ακολουθούν περιμετρικές επιφάνειες και εμποδίζονται από απότομα σύνορα όπως π.χ. τα όρια των πλευρών ενός κύβου. Αν όμως αυτά είναι στρογγυλοποιημένα, τότε η διάδοσή τους συνεχίζεται κανονικά. Χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση αντικειμένων με πολύπλοκες καμπύλες. Μια σχηματική αναπαράσταση είναι η αυτή του **Σχήματος 3.68**.



Σχήμα 3.68 Διάγραμμα κυμάτων Rayleigh που διαδίδονται στην επιφάνεια ενός μετάλλου, κατά μήκος μιας διεπιφάνειας μετάλλου – αέρα.

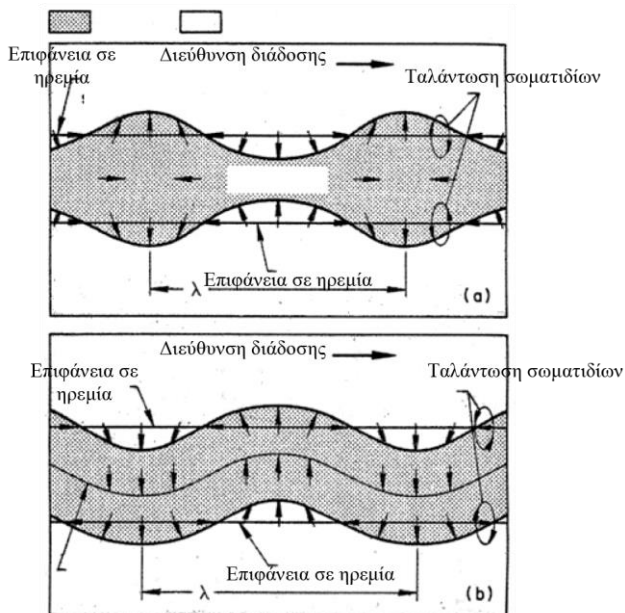
3.10.5.7 Κύματα Lamb

Γνωστά και ως κύματα πλάκας, διαδίδονται σε πλάκες με πάχος μόνο μερικά μήκη κύματος. Το κύμα Lamb αποτελείται από μια σύνθετη ταλάντωση που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το πάχος του υλικού. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του είναι η πυκνότητα, οι ελαστικές ιδιότητες, η δομή και το πάχος του δοκιμίου, καθώς επίσης και η συχνότητα. Η συμπεριφορά τους γενικότερα μοιάζει με εκείνη που παρατηρείται στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από κυματοδηγούς.

Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων Lamb:

- τα συμμετρικά και
- τα ασύμμετρα.

Η κατηγοριοποίηση εξαρτάται από το αν η κίνηση είναι συμμετρική ή ασύμμετρη ως προς τον ουδέτερο άξονα του δοκιμίου, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 3.69**.



Σχήμα 3.69 Διάγραμμα κυμάτων Lamb: (a) Συμμετρικά (b) Ασύμμετρα.

3.10.5.8 Κυριότερες μεταβλητές στην επιθεώρηση με υπερήχους

Συχνότητα

Γενικά πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ των ευνοϊκών και δυσμενών επιδράσεων ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη ισορροπία και να ξεπεραστούν τα όρια που επιβάλλονται κάθε φορά από τον εξοπλισμό επιθεώρησης και το υλικό προς εξέταση.

Η ευαισθησία ή αλλιώς η ικανότητα του συστήματος να εντοπίζει πολύ μικρές ασυνέχειες αυξάνεται σε σχετικά υψηλές συχνότητες (μικρά μήκη κύματος). Η αναλυτική ικανότητα του συστήματος στο να δώσει διαφορετικές ενδείξεις για ασυνέχειες οι οποίες βρίσκονται κοντά ή μια στην άλλη, στο ίδιο βάθος και σε πλάγια θέση, είναι ανάλογη της συχνότητας και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του παλμού ή του μήκους κύματος.

Η ανάλυση γενικά βελτιώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Η διείσδυση, δηλαδή το μέγιστο βάθος μειώνεται με τη χρήση υψηλών συχνοτήτων. Η επίδραση αυτή έχει μεγάλη σημασία στην εξέταση μετάλλων με χονδρόκοκκη δομή ή μικροσκοπικές ανομοιογένειες, λόγω της συνεπαγόμενης σκέδασης ενώ δεν παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα στα ομογενή λεπτόκοκκα μέταλλα.

Ακουστική εμπέδηση

Όταν τα κύματα υπερήχων ταξιδεύοντας σ' ένα μέσο προσκρούουν σε σύνορο ενός άλλου μέσου, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακουστικής ενέργειας ανακλάται πίσω, ενώ η εναπομείνουσα ενέργεια διαδίδεται μέσα στο δεύτερο μέσο. Το χαρακτηριστικό μέγεθος από το οποίο εξαρτάται το ποσοστό ανάκλασης είναι η ακουστική εμπέδηση των δύο υλικών. Αν αυτές είναι ίδιες τότε δεν γίνεται ανάκλαση. Αν οι εμπεδήσεις διαφέρουν πολύ (π.χ. μεταξύ μετάλλου και αέρα), θα γίνει σχεδόν ολική ανάκλαση.

Η ακουστική εμπέδηση διαμήκους κύματος Z_1 , σε γραμμάρια ανά τετραγωνικό εκατοστό και δευτερόλεπτο, ορίζεται ως $Z_1 = \rho \cdot V_1$, όπου ρ η πυκνότητα του υλικού σε γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό και V_1 η διαμήκης ταχύτητα σε εκατοστά ανά δευτερόλεπτο.

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που ανακλάται από τη διεπιφάνεια δύο υλικών εξαρτάται από το λόγο των ακουστικών εμπεδήσεων (Z_2/Z_1) και από τη γωνία πρόσπτωσης. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι 0° (κάθετη πρόσπτωση) ο συντελεστής ανάκλασης, R , που είναι ο λόγος της πυκνότητας της ακτίνας ανάκλασης I_r προς την πυκνότητα της ακτίνας πρόσπτωσης I_i δίνεται από:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = [(z_2 - z_1)/(z_2 + z_1)]^2 = [(r - 1)/(r + 1)]^2$$

όπου $r = \frac{z_2}{z_1}$ ο λόγος εμπεδήσεων.

Αν T είναι ο συντελεστής διάδοσης τότε $T + R = 100\%$ και επειδή T είναι ο λόγος της πυκνότητας της ακτίνας διάδοσης προς την πυκνότητα της ακτίνας πρόσπτωσης δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = 4z_2z_1/(z_2 + z_1)^2 = 4r/(r + 1)^2$$

Γωνία πρόσπτωσης

Μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κύματος είναι κάθετη ως προς τη διεπιφάνεια η διάδοση και η ανάκλαση συμβαίνουν χωρίς αλλαγή της διεύθυνσης της ακτίνας. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα πρέπει να θεωρείται ότι εμφανίζονται τα φαινόμενα της διάθλασης και της αλλαγής της φύσης της κίνησης του κύματος. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να έχουν επίπτωση σε όλη την ακτίνα ή σε ένα ποσοστό της και το συνολικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και την ταχύτητα των κυμάτων που απομακρύνονται από τη διεπιφάνεια. Τα κύματα όμως που τελικά θα διαδοθούν εξαρτώνται και από την ικανότητα της κυματομορφής να υπάρξει μέσα στο υλικό. Ο γενικός νόμος που περιγράφει τη συμπεριφορά αυτή είναι ο νόμος του Snell.

Πυκνότητα ακτίνας

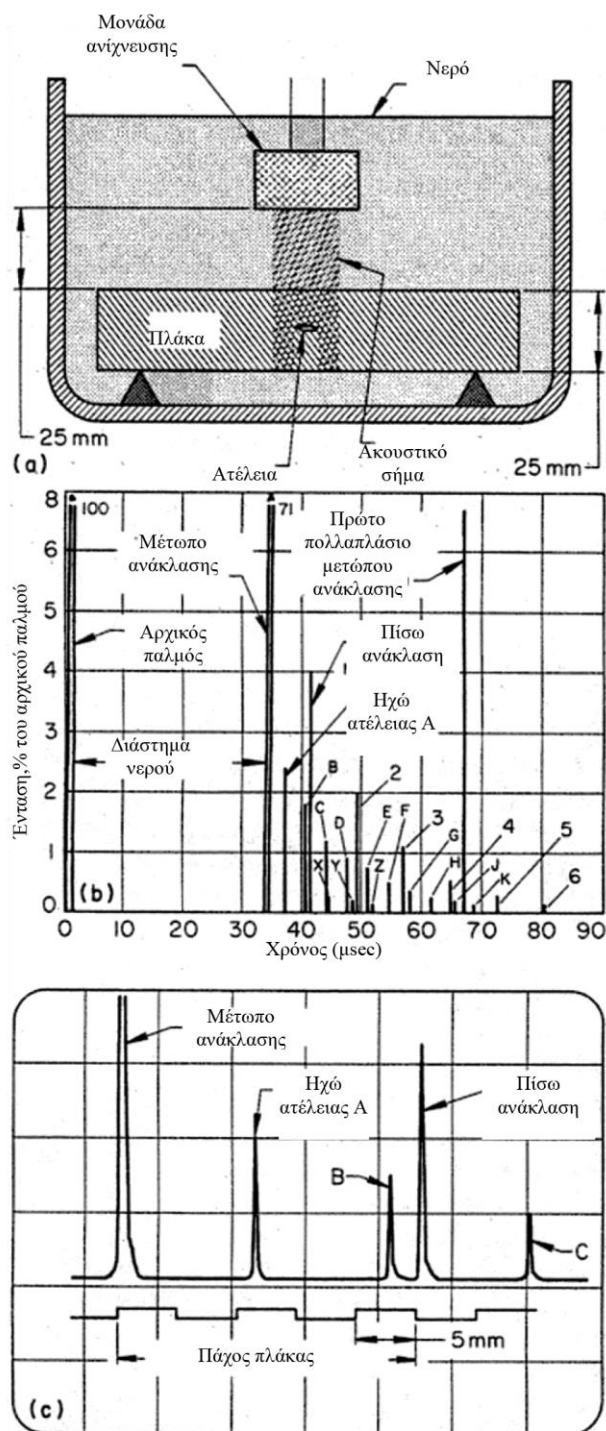
Η πυκνότητα του κύματος έχει άμεση σχέση με το πλάτος των ταλαντώσεων των σωματιδίων. Η ακουστική πίεση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται συχνότερα να δηλώσει το μέγεθος των εναλλασσόμενων τάσεων που επιβάλλονται σε ένα υλικό από το διαδιδόμενο κύμα και εξαρτάται από το προϊόν της ακουστικής εμπίεσης και το πλάτος της κίνησης των σωματιδίων. Το ποσό της ακουστικής πίεσης υψωμένο στο τετράγωνο προσδιορίζει το ποσό της ενέργειας στο κύμα. Η πυκνότητα, η ενέργεια δηλαδή που μεταδίδεται σε μια κάθετη διατομή της ακτίνας, είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ακουστικής πίεσης.

3.10.5.9 Βασικές μέθοδοι επιθεώρησης

Οι δύο κύριοι μέθοδοι επιθεώρησης με υπερήχους είναι η μέθοδος της διάδοσης και η μέθοδος της παλμικής ηχούς. Η κυριότερη διαφορά τους είναι ότι η μέθοδος διάδοσης εμπεριέχει μόνο τη μέτρηση της εξασθένισης του σήματος, ενώ η μέθοδος της παλμικής ηχούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης.

Η μέθοδος της παλμικής ηχούς, που είναι η πιο διαδεδομένη, αποσκοπεί στην ανίχνευση των ήχων που παράγονται όταν ένας υπερηχητικός παλμός ανακλάται από μία ασυνέχεια ή μία διεπιφάνεια ενός δοκιμίου. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό της θέσης των ατελειών και για τη μέτρηση πάχους. Το βάθος της ατέλειας προσδιορίζεται από τον χρόνο που μεσολαβεί από τον αρχικό παλμό μέχρι την παραγόμενη ηχώ από την ατέλεια. Το βάθος προκύπτει και από τη διαφορά των ήχων της ατέλειας και της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου. Το μέγεθος της ατέλειας εκτιμάται από τη σύγκριση του μεγέθους του ανακλωμένου σήματος και ενός ανακλαστή αναφοράς, γνωστού μεγέθους, ή από τη σύγκριση του ανακλωμένου σήματος της ατέλειας και της πίσω επιφάνειας που δεν έχει ατέλειες.

Ακολουθεί το **Σχήμα 3.70**, όπου παρουσιάζεται μία διάταξη παλμικής – ηχούς με τα διαγράμματα του παλμογράφου και της σάρωσης A (Scan-A).



Σχήμα 3.70 Επιθεώρηση κράματος αλουμινίου πάχους 25mm που περιέχει μια επίπεδη ασυνέχεια με βύθιση ευθείας ακτίνας. (α) Διάταξη της επιθεώρησης. (β) Παρουσίαση με τη μορφή σάρωσης – α και (c) Παρουσίαση σε κανονικό παλμογράφο.

3.10.6 Επιθεώρηση με Ραδιογραφία

Η ραδιογραφία είναι ο γενικός όρος των μεθόδων επιθεώρησης των υλικών που βασίζονται στη διαφορετική απορρόφηση της ακτινοβολίας (είτε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μικρού

μήκους κύματος είτε άλλη ειδική ακτινοβολία) που διεισδύει στο προς εξέταση αντικείμενο. Η απορρόφηση ακτινοβολίας ενός υλικού εξαρτάται από την πυκνότητα, το πάχος και από τη σύνθεσή του. Ο όρος ραδιογραφία (με ακτίνες Χ ή με ακτίνες γ) αναφέρεται στις παρακάτω ραδιολογικές τεχνικές.

3.10.6.1 Τύποι ραδιογραφίας

Ραδιογραφία σε φιλμ ή χαρτί

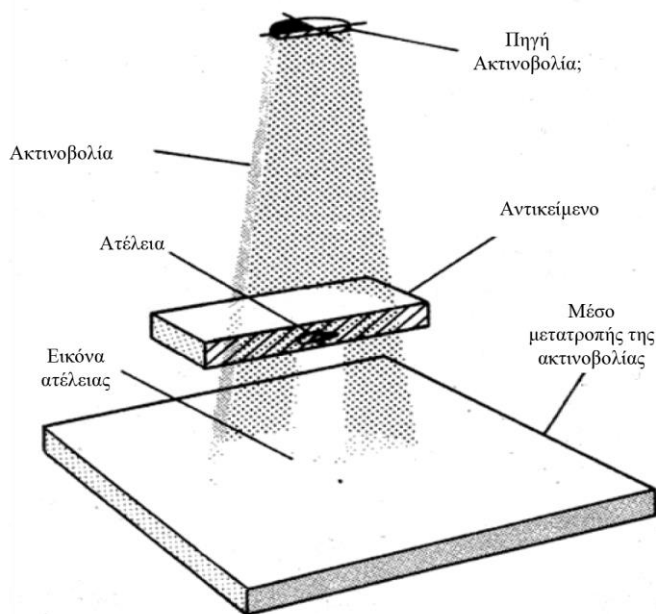
Παράγεται το αρνητικό δύο διαστάσεων της φωτογραφίας λόγω της μη απορροφημένης ακτινοβολίας που τελικά διαπερνάει το δοκίμιο, η οποία προσπίπτει πάνω σε ένα φιλμ ή σε ένα φύλλο χαρτιού και το ενεργοποιεί. Η τεχνική αυτή απαιτεί επιπλέον επεξεργασία του φιλμ ή του χαρτιού ώστε η αρνητική εικόνα να μετατραπεί σε ορατή ένδειξη.

Ραδιογραφία αληθινού χρόνου (ραδιοσκοπία)

Μια δισδιάστατη φωτογραφία μπορεί αμέσως να επιδειχθεί σε μία οθόνη. Η μη απορροφημένη ακτινοβολία μετατρέπεται σε ένα οπτικό ή ηλεκτρονικό σήμα, το οποίο παρατηρείται σε σχεδόν αληθινό χρόνο με ηλεκτρονικό ή βιντεοσκοπικό εξοπλισμό.

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα της ραδιογραφίας αληθινού χρόνου είναι η δυνατότητα της αλλαγής θέσης του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την παρατήρηση εσωτερικών μηχανισμών και τον εντοπισμό ρωγμών και επίπεδων ατελειών, με την προϋπόθεση ότι το δοκίμιο έχει προσανατολιστεί στην κατάλληλη διεύθυνση. Η μετακίνηση του δοκιμίου επίσης σε αληθινό χρόνο παράγει και μια τρισδιάστατη εικόνα της ατέλειας, προσδιορίζοντας ακριβέστερα τη θέση και το μέγεθός της κάτι το οποίο δεν επιτυγχάνεται με τη ραδιογραφία σε φιλμ με μια και μόνο δοκιμή.

Τα τρία βασικά στοιχεία της ραδιογραφίας αποτελούν μία πηγή ακτινοβολίας, ένα δοκίμιο και ένα υλικό ευαίσθητο σε ακτινοβολία (μέσο επαφής) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.71. Το δοκίμιο στο σχήμα είναι μια πλάκα ομοιόμορφου πάχους και περιέχει μια εσωτερική ατέλεια που έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης από το υλικό που την περιβάλλει. Η πυκνότητα της ακτινοβολίας που προσκρούει στο φιλμ κάτω από την περιοχή της ατέλειας είναι εμφανώς διαφορετική από την περιοχή τριγύρω της. Το γεγονός αυτό παράγει μια εικόνα ή μια σκιά της ατέλειας πάνω στο φιλμ.



Σχήμα 3.71 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών στοιχείων ενός συστήματος ραδιογραφίας και του τρόπου με τον οποίο αναδεικνύεται η εσωτερική ατέλεια σε πλάκα ομοιόμορφου πάχους.

3.10.6.2 Εξασθένιση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ραδιογραφία πραγματοποιείται με χρήση ακτίνων Χ ή ακτίνων γ. Η εξασθένισή τους εξαρτάται από τον τύπο, την ένταση, την ενέργειά τους αλλά και από την πυκνότητα και την ατομική δομή του υλικού. Λόγω των ηλεκτρομαγνητικών τους χαρακτηριστικών οι ακτίνες Χ και γ επηρεάζονται από τα ηλεκτρικά πεδία που περιβάλλουν τα άτομα των στοιχείων και τους πυρήνες τους. Η ένταση της ακτινοβολίας μεταβάλλεται εκθετικά με το πάχος του ομογενούς υλικού μέσα από το οποίο περνά σύμφωνα με τη σχέση:

$$I = I_0 \exp(-\mu t)$$

όπου I είναι η ένταση της εκπεμπόμενης από το σώμα ακτινοβολίας, I_0 είναι η αρχική ένταση, t είναι το πάχος του ομογενούς υλικού και μ είναι σταθερά για μια κατάσταση, η οποία όμως κυμαίνεται ανάλογα με το υλικό και την ενέργεια της ακτινοβολίας.

Θεωρητικά υπάρχουν 4 δυνατές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός φωτονίου και του υλικού. Επίσης υπάρχουν 3 πιθανά αποτελέσματα στη συμπεριφορά του φωτονίου μετά την αλληλεπίδραση. Άρα προκύπτουν 12 συνδυασμοί αλληλεπίδρασης και αποτελέσματος, ωστόσο μόνο 4 από αυτούς είναι συνήθως δυνατό να συμβούν. Αυτοί είναι η φωτοηλεκτρική επίδραση, η σκέδαση Rayleigh, η σκέδαση Compton και η «παραγωγή ζεύγους».

3.10.6.3 Φωτοηλεκτρική επίδραση

Είναι η αλληλεπίδραση ενός φωτονίου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο που σκοπό έχει το σπάσιμο του δεσμού του από το άτομο. Η ενέργεια του δεσμού μεταφέρεται ως κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο γενικά εξασθενεί με αύξηση της ενέργειας του φωτονίου, E , εκτός από τα συγκεκριμένα ποσά εκείνα ενέργειας που αντιστοιχούν στις ενέργειες δεσμού στα διάφορα τροχιακά οπότε και παρατηρείται απότομη αύξηση της απορροφούμενης

ακτινοβολίας. Οι απότομες αυξήσεις δίνουν πληροφορίες για τη στοιβάδα στην οποία ανήκει το ηλεκτρόνιο. Για στοιχεία με μικρό ατομικό αριθμό, η φωτοηλεκτρική επίδραση είναι αμελητέα για ενέργειες μεγαλύτερες των 100keV, ενώ για άλλα υλικά είναι ο μεγάλος ατομικός αριθμός που εξηγεί τη σημαντική αναλογία ολικής απορρόφησης για φωτονικές ενέργειες μέχρι και 2MeV.

3.10.6.4 Σκέδαση Rayleigh

Περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός προσπίπτοντος φωτονίου με ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο κατά την οποία το φωτόνιο εκτρέπεται από την πορεία του χωρίς όμως να επέρχεται αλλαγή τόσο στην κινητική ενέργεια του φωτονίου όσο και στην ολική ενέργεια του ατόμου. Επιπλέον κανένα ηλεκτρόνιο δεν απομακρύνεται από το άτομο. Η γωνία εκτροπής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα πρόσκρουσης του φωτονίου.

Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό κυρίως για στοιχεία με μεγάλο ατομικό αριθμό και για χαμηλές φωτονικές ενέργειες. Ωστόσο το φαινόμενο αυτό ποτέ δεν συμβάλλει πάνω από το 20% της συνολικής εξασθένισης-απορρόφησης της ακτινοβολίας στην εξέταση με ακτίνες Χ.

3.10.6.5 Σκέδαση Compton

Κατά την αλληλεπίδραση αυτού του τύπου το ηλεκτρόνιο εκτοξεύεται από το άτομο με κατανάλωση μόνο ενός μικρού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του φωτονίου. Το φωτόνιο σκεδάζεται σε κατεύθυνση διαφορετική της αρχικής με μειωμένη ενέργεια και, συνεπώς, με μικρότερο μήκος κύματος. Το φαινόμενο εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό και την ενέργεια του φωτονίου.

3.10.6.6 Παραγωγή ζεύγους

Πρόκειται για μια διαδικασία απορρόφησης κατά την οποία δημιουργούνται δύο φωτόνια ενέργειας της τάξης των 0,5MeV με κατανάλωση ενός υψηλής ενέργειας φωτονίου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αρχικά το φωτόνιο της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου το οποίο εκτοξεύεται από το άτομο. Το γεγονός αυτό συμβαίνει μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από 1,02MeV (η τιμή αυτή υπαγορεύεται από τη θεωρία της σχετικότητας που υπολογίζει ότι καταναλώνεται 0.51MeV για τη δημιουργία της μάζας του κάθε σωματιδίου, του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου). Το ποζιτρόνιο του ζεύγους καταστρέφεται από την αλληλεπίδραση με άλλο ηλεκτρόνιο σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Η καταστροφή του αυτή παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τη μορφή δύο φωτονίων που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις

3.10.6.7 Συνολική απορρόφηση

Είναι το σύνολο των απορροφήσεων των τεσσάρων φαινομένων. Ο συντελεστής ατομικής απορρόφησης εκφράζεται ως:

$$\mu_a = \sigma_{pe} + \sigma_R + \sigma_C + \sigma_{pr}$$

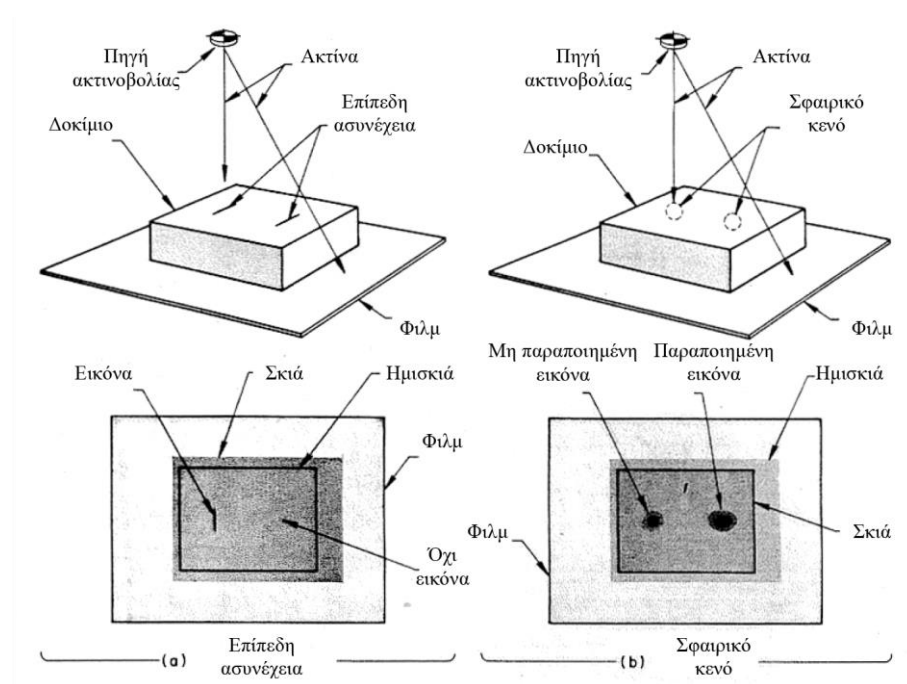
όπου σ_i είναι η εξασθένιση που οφείλεται στο κάθε φαινόμενο.

Από τον υπολογισμένο συντελεστή ατομικής απορρόφησης μπορούμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή απορρόφησης μάζας πολλαπλασιάζοντας τον πρώτο με τον αριθμό avogadro N και διαιρώντας με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου A:

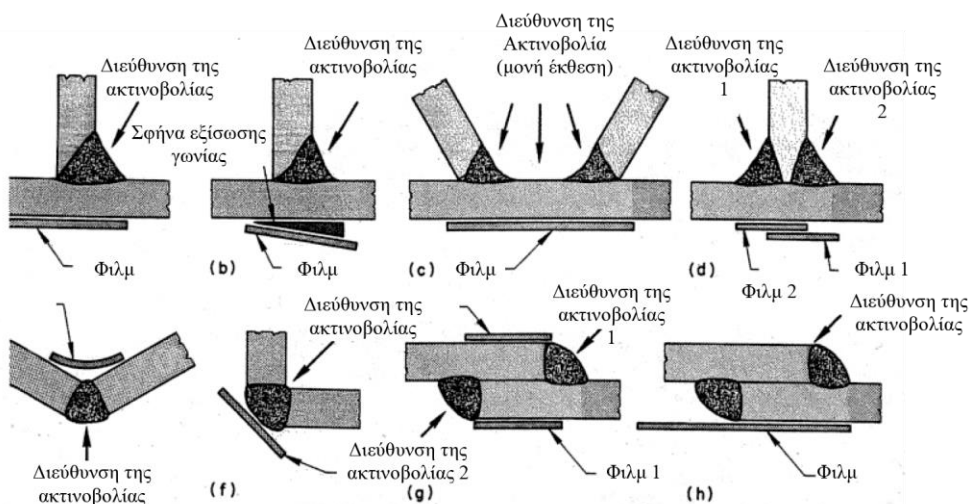
$$\mu_m = \frac{\mu_a N}{A}$$

Εκτός των υπόλοιπων παραμέτρων που επηρεάζουν τη ραδιογραφία όπως η ένταση της ακτινοβολίας, ο τύπος του φιλμ αποτύπωσης, τα χαρακτηριστικά του υλικού, ιδιαίτερη σημασία έχει η διεύθυνση της ακτινοβολίας. Υπάρχει περίπτωση να εντοπιστούν ορισμένες ατέλειες, όμως λόγω λανθασμένης επιλογής της γωνίας ή και του σημείου πρόσπτωσης να δημιουργηθεί μια μη ικανοποιητική ποιότητα φωτογραφίας. Ενδέχεται, βέβαια, να μην ανιχνευτούν καθόλου. Μια ρωγμή, για παράδειγμα, σε μια περιοχή ενός χυτού ή μιας συγκολλημένης κατασκευής σχήματος T είναι περισσότερο πιθανό να αποκαλυφθεί όταν η ακτινοβολία κατευθύνεται κατά μήκος της διχοτόμου της γωνίας που σχηματίζουν τα δύο πόδια της κατασκευής.

Μια απλή σχηματική απεικόνιση της σωστής και λανθασμένης εξέτασης σφαιρικών και μη ατελειών παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.72**, ενώ στο **Σχήμα 3.73** φαίνονται οι κατάλληλες διευθύνσεις ακτινοβολίας για την επιθεώρηση συγκολλημένων κατασκευών.



Σχήμα 3.72 Επίδραση της διεύθυνσης της ακτίνας στην εμφάνιση (a) επίπεδων και (b) σφαιρικών ασυνεχειών.



Σχήμα 3.73 Προτεινόμενες διευθύνσεις ακτινοβολίας για διάφορους τύπους συγκολλημένων ενώσεων.

3.10.7 Ραδιογραφία Νετρονίων

Η ραδιογραφία νετρονίων είναι ένα είδος μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιεί ειδικού τύπου ακτινοβολία, τα νετρόνια, για να σχηματιστεί η ραδιογραφική εικόνα του δοκιμίου. Οι γεωμετρικές αρχές σχηματισμού της σκιάς, η διακύμανση της απόσβεσης ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου και άλλες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη δοκιμή είναι παρόμοιες με αυτές της ραδιογραφίας.

3.10.7.1 Αρχές – Πηγές νετρονίων

Η ραδιογραφία με νετρόνια ομοιάζει με τη συμβατική ραδιογραφία στο ότι εκμεταλλεύεται τη διακύμανση στην πυκνότητα της ακτινοβολίας ενός αντικειμένου, προκειμένου να μετατρέψει σε εικόνα μακροσκοπικές του λεπτομέρειες. Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης του υλικού για τη μέθοδο νετρονίων και ακτίνων Χ διαφέρουν σημαντικά, με αποτέλεσμα οι δύο μέθοδοι να αλληλοσυμπληρώνονται.

Τα νετρόνια παράγονται από πυρηνικές αντιδράσεις, από επιταχυντές και ορισμένα ραδιενεργά ισότοπα. Επειδή η ταχύτητα με την οποία εκπέμπονται είναι σχετικά μεγάλη (γρήγορα νετρόνια) και επειδή η ραδιογραφία διενεργείται με νετρόνια χαμηλής ενέργειας (θερμικά νετρόνια), οι πηγές περιβάλλονται συνήθως από κατάλληλους εξασθενητές που μειώνουν την κινητική ενέργεια των νετρονίων.

Τα νετρόνια είναι σωματίδια που χαρακτηρίζονται από μεγάλη μάζα και ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο. Η εξασθένιση (attenuation) των νετρονίων είναι διαφορετική από αυτή των ακτίνων Χ, διότι οι διεργασίες είναι πυρηνικές και δεν εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση με τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα.

Όταν ένα νετρόνιο συγκρούεται με τον πυρήνα ενός ατόμου και απλά διαθλάται μεταδίδει μικρό ποσό από την κινητική του ενέργεια στο άτομο. Η διαδικασία αυτή που ονομάζεται σκέδαση μειώνει την πιθανότητα το νετρόνιο να διαπεράσει το αντικείμενο προς μία διεύθυνση ώστε να ανιχνευθεί από μία συσκευή πίσω από το αντικείμενο.

Η μεγάλη απορρόφηση συμβαίνει όταν τα νετρόνια εγκλωβίζονται στον πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο οι πυρήνες – στόχοι μεταβάλλονται και προκύπτει το επόμενο ισότοπο του εν λόγω στοιχείου το οποίο τις περισσότερες φορές διακρίνεται από τέτοια αστάθεια ώστε υφίσταται ραδιενεργή εξασθένιση. Η πιθανότητα μια σύγκρουση μεταξύ ενός νετρονίου και ενός πυρήνα να έχει ως αποτέλεσμα την αιχμαλώτιση του νετρονίου εκφράζεται ως «δραστική περιοχή» ανά άτομο (effective area per atom) και η μονάδα είναι το barn = 10^{-24} cm².

Παράμετροι που επιδρούν στο φαινόμενο είναι η ενέργεια των νετρονίων, ο ατομικός αριθμός και η μάζα. Για «θερμικά νετρόνια» (ενέργεια περίπου $4 \times 10^{-21} \text{J}$ ή $0,025 \text{eV}$) η «δραστική περιοχή» ποικίλλει ανάλογα με τον ατομικό αριθμό και είναι υψηλή για μερικά στοιχεία και χαμηλή για άλλα. Η δραστική περιοχή εξαρτάται περισσότερο από το ισότοπο που προκύπτει παρά από το στοιχείο από το οποίο προέρχεται. Ωστόσο συνήθως καθορίζεται μια μέση τιμή για κάθε στοιχείο. Για ενδιάμεσα νετρόνια (ενέργεια περίπου ίση με $8 \times 10^{-20} \text{J}$ έως $1,6 \times 10^{-15} \text{J}$ ή $0,5 \text{eV}$ έως 10keV) και για γρήγορα νετρόνια (ενέργεια μεγαλύτερη από $1,6 \times 10^{-15} \text{J}$ ή 10keV) η δραστική περιοχή είναι φυσικά μικρότερη από ότι στα θερμικά και εξαρτάται λιγότερο από τον ατομικό αριθμό.

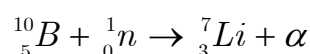
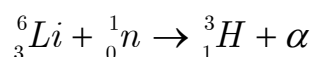
3.10.7.2 Μέθοδοι ανίχνευσης με νετρόνια

Στις μεθόδους αυτές χρησιμοποιείται συνήθως φωτογραφικό φιλμ για ακτίνες Χ.

Άμεση μέθοδος

Στην ονομαζόμενη μέθοδο «άμεσης έκθεσης» το φιλμ εκτίθεται κατ' ευθείαν στη δέσμη νετρονίων μέσω φίλτρου μετατροπής ή φύλλου ενίσχυσης που παράγουν ουσιαστικά τη δευτερογενή ακτινοβολία που εκθέτει το φιλμ όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.74 (α)**.

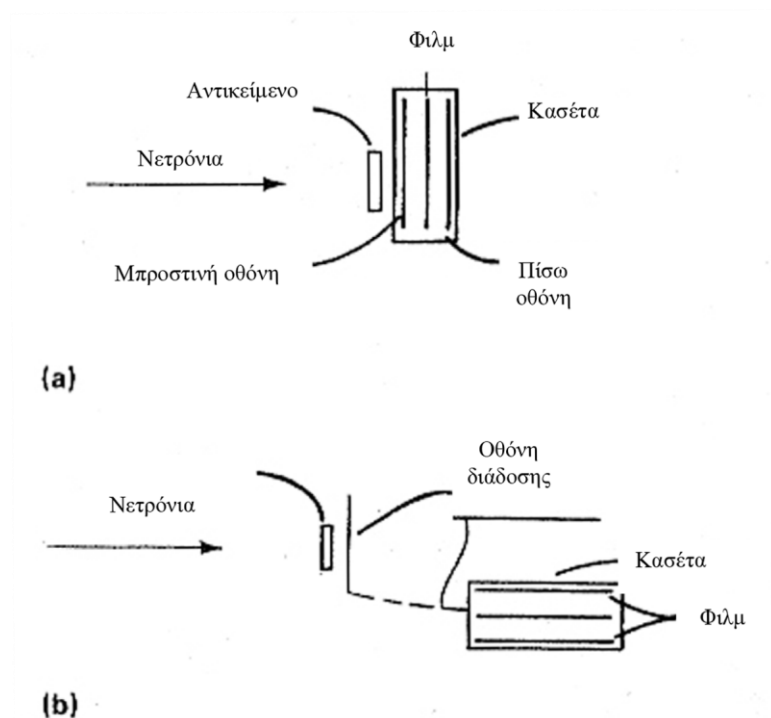
Φίλτρα μετατροπής από φύλλο γαδολίνιου όταν βομβαρδίζονται από νετρόνια τα απορροφούν και εκπέμπουν ακτίνες γ. Με τη σειρά τους οι ακτίνες γ παράγουν ηλεκτρόνια τα οποία προσβάλλουν το φιλμ. Η πυκνότητά τους συνδέεται με την πυκνότητα της ακτίνας νετρονίων. Αυτόν τον σκοπό εξυπηρετούν και ορισμένα φθορίζοντα υλικά φτιαγμένα από θειούχο ψευδάργυρο που περιέχει συγκεκριμένα ισότοπα όπως ${}^6_3\text{Li}$ ή ${}^{10}_5\text{B}$. Αυτά αντιδρούν με νετρόνια σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Τα σωματίδια α που εκπέμπονται κάνουν το θειούχο ψευδάργυρο να φθορίζει και έτσι εκτίθεται η πληροφορία στο φιλμ.

Η μέθοδος «μεταφοράς»

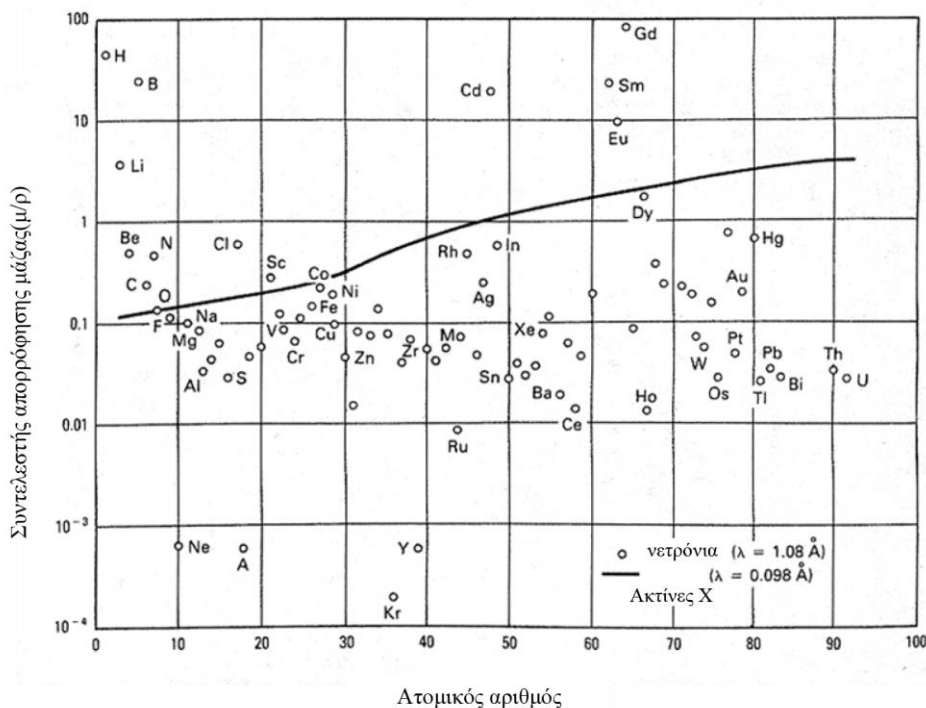
Ένα λεπτό φύλλο μετάλλου, που λέγεται φίλτρο μεταφοράς, και που συνήθως είναι ίνδιο ή δυσπρόσιο, εκτίθεται στην ακτίνα νετρονίων που μεταδίδεται μέσα από το αντικείμενο. Η αιχμαλώτιση νετρονίων από το ισότοπο παράγει ραδιενέργεια. Στη συνέχεια, φίλτρο μετατροπής τοποθετείται σε επαφή με το φιλμ και η ραδιενέργεια προσβάλλει το τελευταίο, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 3.74 (β)**.



Σχήμα 3.74 Ραδιογραφία νετρονίων με χρήση των μεθόδων. (α) Άμεσης έκθεσης και (β) Μεταφοράς.

Σύγκριση ραδιογραφίας νετρονίων με ακτίνες Χ

Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η εξασθένιση των νετρονίων καθώς περνά μέσα από το υπό εξέταση αντικείμενο σχετίζεται περισσότερο με την παρουσία του συγκεκριμένου ισοτόπου παρά με την πυκνότητα ή τον ατομικό αριθμό. Οι ακτίνες Χ εξασθενούν περισσότερο από στοιχεία με μεγάλο ατομικό αριθμό και μεγάλης πυκνότητας. Για τα «θερμικά» νετρόνια, η εξασθένιση τείνει να μειωθεί με την αύξηση του ατομικού αριθμού αν και η τάση αυτή δεν είναι ομαλή σχέση. Επί πλέον μερικά ελαφριά στοιχεία (υδρογόνο, λίθιο, βόριο), μερικά μέτρια – προς – βαριά στοιχεία (κάδμιο, σαμάριο, ευρώπιο, γαδολίνιο, δυσπρόσιο) και μερικά συγκεκριμένα ισότοπα έχουν μία εξαιρετικά μεγάλη ικανότητα να εξασθενούν τα θερμικά νετρόνια (**Σχήμα 3.75**). Αυτό σημαίνει ότι η ανίχνευσή τους σε ένα υλικό χαμηλής εξασθένισης είναι εύκολη.



Σχήμα 3.75 Συντελεστές εξασθένησης μάζας των στοιχείων, συναρτήσει του ατομικού τους αριθμού οι οποίοι ισούται με το λόγο του συντελεστή γραμμικής εξασθένησης, μ , προς την πυκνότητα ρ του υλικού.

Τα θερμικά νετρόνια επιτρέπουν τη ραδιογραφική οπτικοποίηση στοιχείων με χαμηλό ατομικό αριθμό ακόμα και αν συνυπάρχουν με στοιχεία υψηλού ατομικού αριθμού όπως ο σίδηρος, το ουράνιο και το μόλυβδο.

Είναι δυνατή επίσης και η ραδιογραφική ανίχνευση ορισμένων ισοτόπων (όπως π.χ. ισότοπα του υδρογόνου, του καδμίου, του ουρανίου), και αυτό γιατί κάποιες μέθοδοι είναι ελάχιστα ως καθόλου ευαίσθητες στις πρωτογενείς ακτίνες Χ ή γ.

Τα χαρακτηριστικά της ραδιογραφίας νετρονίων συμπληρώνουν τη συμβατική ραδιογραφία και συνήθως η μία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η άλλη ή δεν μπορεί να εφαρμοστεί ή πραγματοποιείται με δυσκολία.

3.10.8 Θερμική Επιθεώρηση

Η θερμική επιθεώρηση συγκεντρώνει όλες εκείνες τις μεθόδους όπου χρησιμοποιούνται συσκευές που ανιχνεύουν θερμότητα, ώστε να επιτυγχάνεται μέτρηση σε μεταβολές της θερμοκρασίας σε διάφορα συστήματα, κατασκευές ή φυσικές διεργασίες. Οι θερμικές μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύσουν ατέλειες κάτω από την επιφάνεια, αρκεί το βάθος τους να μην είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τη διάμετρό τους και η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του αντικείμενου. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε πολύπλοκα σχήματα ή σύνθετα αντικείμενα όμοιων ή ανόμοιων υλικών. Επιπλέον, λόγω της διαθεσιμότητας συστημάτων ανίχνευσης υπερέυθρων η θερμική εξέταση παρέχει γρήγορη και χωρίς επαφή σάρωση επιφανειών. Στην κατηγορία αυτή δεν υπάγονται οι μέθοδοι εκείνες όπου ένα αντικείμενο διεγείρεται θερμικά και μία μη θερμική συσκευή χρησιμοποιείται για τη λήψη του σήματος.

3.10.8.1 Αρχές

Η θερμική επιθεώρηση αφορά τη μέτρηση και χαρτογράφηση των επιφανειακών θερμοκρασιών όταν θερμότητα ρέει από, προς ή διαμέσου ενός δοκιμίου. Οι διαφορετικές

θερμοκρασίες σε μια επιφάνεια, και οι μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας με τον χρόνο, συνδέονται με τους τύπους ροής θερμότητας και μπορούν να αποτελέσουν σημείο αναφοράς για τον εντοπισμό ατελειών ή τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας ενός δοκιμίου. Π.χ. κατά τη λειτουργία ενός συστήματος θέρμανσης ένα «ζεστό σημείο» που ανιχνεύεται στην ένωση ενός σωλήνα θέρμανσης μπορεί να οφείλεται σε διαρροή ζεστού αέρα. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η εμφάνιση ενός «ζεστού σημείου» σε μια πλάκα που αποτελείται από δύο στρώματα όταν θερμαίνεται το ένα από αυτά. Μια τοπική αποσύνδεση του στρώματος που θερμαίνεται και του άλλου στρώματος θα εμποδίσει τη ροή θερμότητας και η περιοχή θα υπερθερμανθεί σε σχέση με την υπόλοιπη πλάκα. Γενικά, όσο μεγαλύτερη και κοντά στην επιφάνεια βρίσκεται η ατέλεια, τόσο μεγαλύτερο είναι και το διαφορικό της θερμοκρασίας.

3.10.8.2 Μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας

Η θερμότητα μεταξύ μιας ζεστής περιοχής προς μια ψυχρότερη μέσα σε ένα αντικείμενο θα διαδοθεί με αγωγή, ενώ μεταξύ ενός αντικειμένου και του περιβάλλοντός του με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία.

Μέσα σε ένα στερεό ή ρευστό η αγωγή συμβαίνει λόγω των φωνονικών ταλαντώσεων των ατόμων ή των μορίων και μεταφέρεται μέσω των ατομικών δεσμών σε γειτονικά άτομα ή μόρια. Αντίθετα, στο αέριο το φαινόμενο αυτό εμποδίζεται λόγω της μεγαλύτερης απόστασης μεταξύ των ατόμων ή των μορίων, δηλαδή λόγω της απώλειας ισχυρών δεσμών και χρειάζονται συγκρούσεις για να μεταφερθεί ενέργεια. Όταν ένα αέριο ή ρευστό ρέει σε ένα στερεό, η διάδοση της θερμότητας γίνεται με συναγωγή η οποία εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα ροής.

Αν και η αγωγή και η συναγωγή είναι οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας, η φύση της θερμικά επαγομένης ακτινοβολίας μπορεί να είναι σημαντική, ειδικά όταν η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με αισθητήρες ακτινοβολίας.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα θερμαινόμενο σώμα όταν τα ηλεκτρόνιά του μεταπίπτουν σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Το μήκος κύματος και η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία των επιφανειακών ατόμων ή μορίων. Για ένα μέλαν σώμα (black-body) το μήκος κύματος και η ενέργεια εκπομπής μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.76**.

Από αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι στους 300°K (θερμοκρασία μιας σχετικά ζεστής μέρας), το μήκος κύματος που κυριαρχεί είναι τα 10μm δηλαδή υπέρυθρη ακτινοβολία. Μια επιφάνεια θα πρέπει να είναι πολύ πιο ζεστή ώστε το κυρίαρχο μήκος κύματος να πέφτει στην ορατή περιοχή κάτω από το 0,7μm (π.χ. ο ζεστός κόκκινος χάλυβας). Ωστόσο τα περισσότερα αντικείμενα στη θερμική επιθεώρηση εξετάζονται σε θερμοκρασίες δωματίου και εκπέμπουν στην υπέρυθρη περιοχή.

Η διάδοση της θερμότητας εξαρτάται επιπλέον από τα χαρακτηριστικά του υλικού και η εξέταση πολλές φορές εξαρτάται από τις τοπικές διακυμάνσεις τους μέσα σ' αυτό. Τα χαρακτηριστικά είναι:

- Ειδική θερμότητα, c , που είναι το ποσό της θερμότητας που απορροφά μια συγκεκριμένη μάζα υλικού για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ένα συγκεκριμένο ποσό.
- Η πυκνότητα, ρ , που είναι η μάζα ανά όγκο υλικού.
- Η θερμική αγωγιμότητα, k , είναι το ποσό θερμότητας που ρέει σε δοσμένη κατεύθυνση όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα στο υλικό.
- Θερμική διαχυσιμότητα, α , που είναι η ταχύτητα με την οποία ρέει η θερμότητα από μια περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον υλικό.

- Η σταθερά συναγωγής, b , που είναι μέτρο της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός αερίου ή ρευστού.

Η θερμική επιθεώρηση εξαρτάται από αυτά τα χαρακτηριστικά σε ό, τι αφορά τη δημιουργία τοπικά μετρήσιμων θερμοκρασιακών διαφορικών. Για παράδειγμα, όταν ένα δοκίμιο με ανομοιομορφία στην πυκνότητα, το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση ενιαίας θερμοκρασίας, θερμαίνεται ή ψύχεται, η μεταβολή της θερμοκρασίας θα συμβεί πιο αργά στις περιοχές με μεγάλη πυκνότητα. Η διαφορά στον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας είναι ένα μετρήσιμο φαινόμενο.

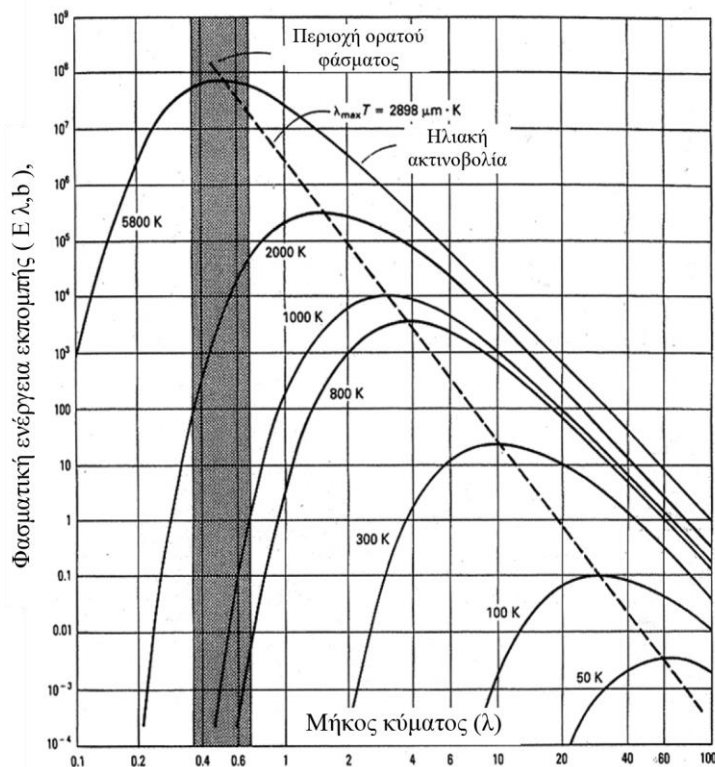
Ένα τελευταίο σημαντικό χαρακτηριστικό της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία είναι η εκπεμπιμότητα, ϵ , μιας επιφάνειας. Η εκπεμπιμότητα υποδεικνύει την ιδιότητα της επιφάνειας να λειτουργεί ως εκπομπός ή απορροφητής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα μελανά σώματα (black bodies), που είναι οι πιο αποτελεσματικοί εκπομπείς, έχουν εκπεμπιμότητα 1.0. Όλα τα άλλα σώματα έχουν μικρότερη από 1.0. Η εκπεμπιμότητα είναι συνάρτηση διαφόρων μεταβλητών, όπως του χρώματος και της σκληρότητας της επιφάνειας.

Στη θερμική επιθεώρηση το προς εξέταση αντικείμενο μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως θερμικά ενεργό ή θερμικά παθητικό. Το θερμικά ενεργό παράγει την απαραίτητη ροή θερμότητας κατά τη διεργασία, ενώ το θερμικά παθητικό απαιτεί εξωτερική πηγή θερμότητας.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών. Αυτοί που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια και αυτοί που παραμένουν σε κάποια απόσταση από αυτή.

Η πρώτη κατηγορία αισθητήρων περιλαμβάνει υλικά επιστρώματα και θερμοηλεκτρικές συσκευές. Τα επιστρώματα είναι σχετικά φθηνά για να κατασκευαστούν και απλά στην εφαρμογή τους. Μπορεί όμως να μην είναι ικανά να παρέχουν ποσοτικές μετρήσεις αλλά μόνο ποιοτικές (εκτός από τα επιστρώματα με υγρούς κρυστάλλους, τα οποία μπορεί να διακριβωθούν ώστε να επιτυγχάνουν σχετικά μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι επηρεάζουν τα θερμικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

Η δεύτερη κατηγορία αισθητήρων εξαρτάται από τη θερμικά παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σε θερμοκρασίες δωματίου, η ενέργεια αυτή βρίσκεται στην υπέρυθη περιοχή. Οι μετρήσεις χωρίς επαφή λοιπόν αφορούν τη χρήση υπέρυθρων αισθητήρων.



Σχήμα 3.76 Φασματική ενέργεια εκπομπής μελανού σώματος συναρτήσει του μήκους κύματος.

3.10.8.3 Μέθοδοι επιθεώρησης

Μέθοδοι σταθερής κατάστασης

Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ανωμαλιών όπου η θερμοκρασία αλλάζει πολύ λίγο με το χρόνο. Πολλά από τα θερμικά ενεργά αντικείμενα παρατηρούνται με αυτόν τον τρόπο όπως π.χ. ένας σωλήνας ατμού που ελέγχεται για ανωμαλίες ως προς τη μόνωσή του. Λόγω των μεγάλων διαφορών στη θερμοκρασία παράγεται εύκολα μια εικόνα όπου οι ανωμαλίες φαίνονται ως κόκκινα σημεία.

Η μεγάλη πρόκληση όμως είναι η εξέταση θερμικά παθητικών στοιχείων όπου ουσιαστική σημασία έχει η διατήρηση της ομοιομορφίας της θέρμανσης ή ψύξης αντίστοιχα, ώστε οι θερμοκρασιακές μεταβολές να διατηρούνται και να εντοπίζονται. Γενικά οι ανωμαλίες θα πρέπει να είναι μεγάλες, κοντά στην επιφάνεια, και να δημιουργούν ευρείες θερμοκρασιακές διαφορές.

Μέθοδοι βασιζόμενες στο χρόνο

Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ανωμαλιών όπου οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται με το χρόνο κατά την εξέταση. Οι διαφορές αυτές αναπτύσσονται και εξαφανίζονται, καθώς το αντικείμενο μεταβαίνει από μια θερμοκρασία σε μία άλλη. Π.χ. ένα μέρος αεροπλάνου με κρυμμένη διάβρωση μπορεί να θερμανθεί ενεργά από τη μια μεριά και στη συνέχεια να αφεθεί να κρυώσει. Οι περιοχές με παγιδευμένο νερό θα κρυώσουν αργότερα και θα δημιουργήσουν ένα προσωρινό θερμό σημείο, ενώ οι διαβρωμένες περιοχές θα ψυχθούν σχετικά γρήγορα σε σχέση με το υπόλοιπο μέρος και θα δημιουργήσουν ένα κρύο σημείο. Γενικά αυτή η μέθοδος παρέχει μέγιστη ευαισθησία και επιτρέπει τη γρήγορη επιθεώρηση.

3.10.8.4 Ερμηνεία (interpretation) εικόνας

Το μέρος αυτό της εξέτασης είναι το πιο δύσκολό της, γιατί θα πρέπει να διαχωριστεί η πραγματική ένδειξη μιας ανωμαλίας από τους παράγοντες που υπεισέρχονται και

επηρεάζουν την ένδειξη. Έτσι, λοιπόν, όσο πιο κοντά στην επιφάνεια βρίσκεται μια ανωμαλία τόσο ισχυρότερη ένδειξη δίνει και διευκολύνει την εκτίμηση ακόμα και του σχήματος και μεγέθους της. Η θερμική εικόνα που ουσιαστικά εικονίζει τη ροή θερμότητας επηρεάζεται άμεσα από κενά ή ενισχύσεις κάτω από την επιφάνεια. Επίσης, στα γεωμετρικά όρια του αντικειμένου παρατηρείται διαφορετική ροή από ό,τι στο κυρίως μέρος του. Αντικείμενο που υποστηρίζει το δοκίμιο και αυτό συμβάλλει στη δημιουργία της εικόνας, αφού συνήθως αυτό αποτελεί άλλη πηγή μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, σημαντικό ρόλο, όπως είδαμε, έχει και η εκπεμπιμότητα. Ακολουθεί παράδειγμα εξέτασης δείγματος αλουμινίου. Πρόκειται για τη διάταξη επιθεώρησης μιας ραφής που ενώνει δύο μικρά ελάσματα αλουμινίου. Η ραφή, που δεν χαρακτηρίζεται από κάποιο ελάττωμα, έχει πάχος 1mm και διατομή κάθετη στην ακτινοβολία 15 x 15 mm. Οι περισσότερες θερμές περιοχές (δεξιά και αριστερά της θερμικής εικόνας) αντιστοιχούν στις περιοχές όπου υπάρχει μονό έλασμα, οι οποίες και θερμαίνονται γρηγορότερα από τη συγκολλημένη περιοχή, η οποία απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα στο κέντρο. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στον ρυθμό θέρμανσης, ώστε να αποφευχθεί σημαντική διάδοση θερμότητας από τις ζεστές περιοχές μονού ελάσματος προς την περιοχή συγκόλλησης.

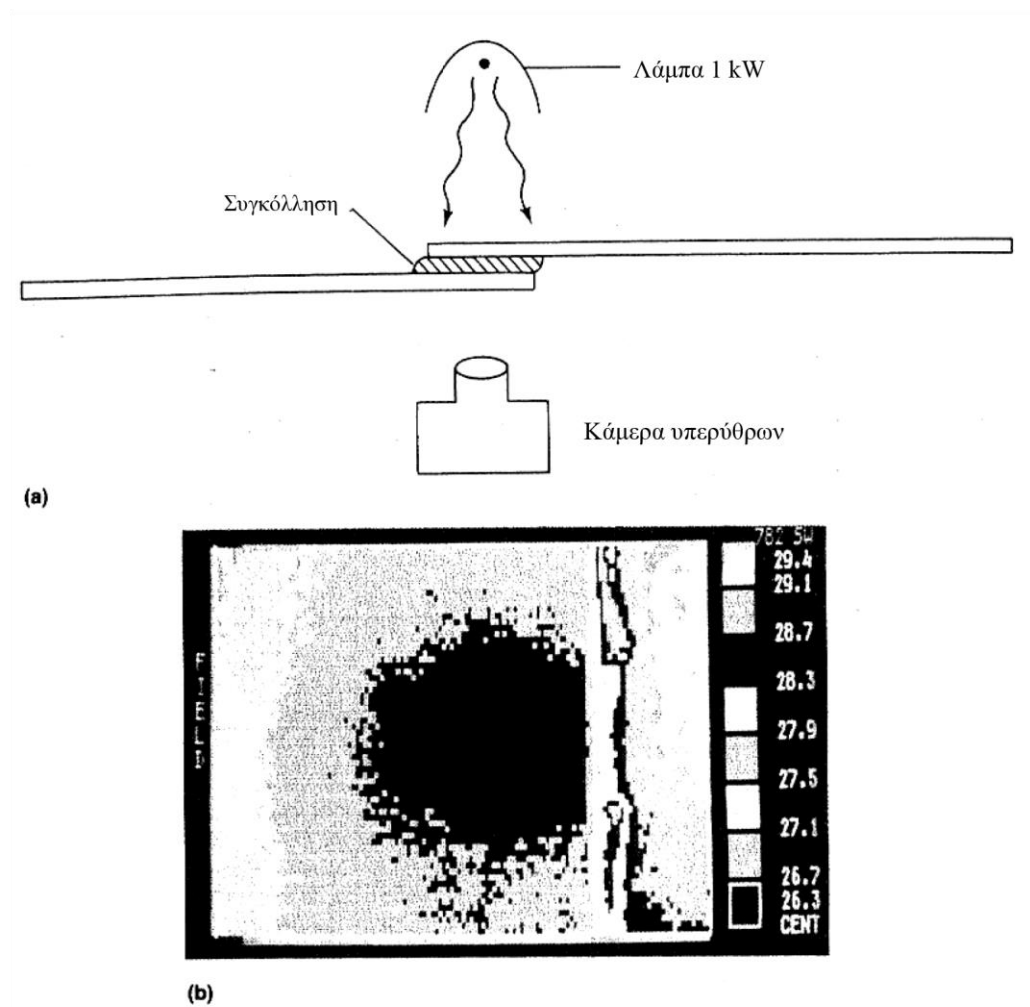
3.10.9 Οπτική Ολογραφία

Ολογραφία είναι η διεργασία δημιουργίας της συνολικής εικόνας (δηλαδή μιας τρισδιάστατης εικόνας) ενός σχετικά ανακλαστικού αντικειμένου αυθαίρετου σχήματος. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μια διαδικασία εγγραφής και, στη συνέχεια, επανακατασκευής μετώπων κυμάτων που ανακλώνται από ή διαδίδονται μέσα σε ένα αντικείμενο, και περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, και το πλάτος και η φάση οποιασδήποτε συνεκτικής κυματικής κίνησης που προέρχεται από το αντικείμενο εγγράφεται κωδικοποιώντας την πληροφορία αυτή σε κατάλληλο μέσο. Η εγγραφή αυτή ονομάζεται ολόγραμμα. Στη συνέχεια η κυματική κίνηση ανακατασκευάζεται από το ολόγραμμα με μια συνεκτική δέσμη, με αποτέλεσμα την αναγέννηση μιας εικόνας που έχει το αληθινό σχήμα του αντικειμένου που ενδιαφέρει. Η χρησιμότητα της οπτικής ολογραφίας για τη μη καταστροφική επιθεώρηση των υλικών και των κατασκευών συνιστάται στο γεγονός ότι η ανακατασκευασμένη εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μιας μορφής τρισδιάστατο περίγραμμα στο οποίο μπορεί να παρατηρηθεί και να μετρηθεί κάθε απόκλιση από την πραγματική μορφή και διαστάσεις του.

3.10.9.1 Εγγραφή ολογράμματος

Όταν χρησιμοποιείται ορατό φως στην ολογραφία, το ολόγραμμα εγγράφεται με ένα οπτικό σύστημα που αναφέρεται ως ολοκάμερα. Μία μονοχρωματική ακτίνα λείζερ διαιρείται σε δύο ακτίνες από έναν μεταβλητό διαιρέτη ακτίνας. Η μία ακτίνα –η αντικειμενική- διέρχεται και φιλτράρεται από έναν φακό, ο οποίος περιορίζει την επίδραση της βρωμιάς και της σκόνης στην κατεύθυνση της ακτίνας. Η εκτρεπομένη ακτίνα, στη συνέχεια, κατευθύνεται ώστε να φωτίσει ομοιόμορφα το αντικείμενο. Ένα ποσοστό της ακτίνας λείζερ που αντανάκλαται από το αντικείμενο συλλέγεται σε μια φωτογραφική πλάκα υψηλής ανάλυσης όπως εικονίζεται στο **Σχήμα 3.77 (α)**. Η δεύτερη ακτίνα -η ακτίνα αναφοράς- που προέρχεται από τον διαιρέτη, περνά από ένα δεύτερο φίλτρο και κατευθύνεται πάνω στη φωτογραφική πλάκα.

Με τις δύο αυτές συνεκτικές ακτίνες να εκτίθενται πάνω στη φωτογραφική πλάκα διαδοχικά, παράγεται ένα μοντέλο παρεμβολής το οποίο και καταγράφεται πάνω στη φωτογραφική πλάκα (γαλάκτωμα). Αυτό το μοντέλο περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την ανακατασκευή υψηλής ποιότητας τρισδιάστατης εικόνας του αντικειμένου.



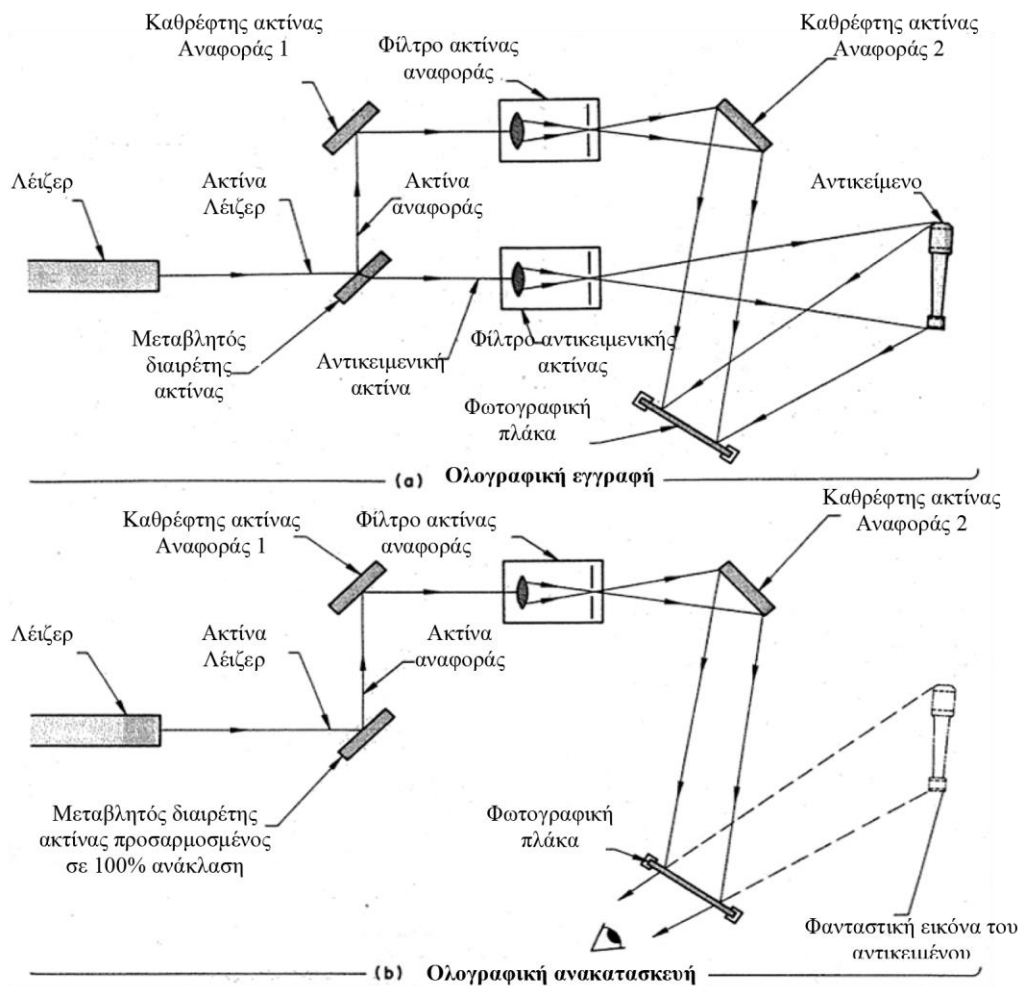
Σχήμα 3.77 Θερμογραφική επιθεώρηση συγκολλημένων φύλλων αλουμινίου. (α) Σχηματική αναπαράσταση της θερμικής διάταξης. (β) Θερμική εικόνα.

3.10.9.2 Ολογραφική αναπαραγωγή

Στη διεργασία της ανακατασκευής το μοντέλο παρεμβολής του ολογράμματος χρησιμοποιείται ως ένα κιγκλίδωμα (grating) περίθλασης. Όταν αυτό το κιγκλίδωμα φωτίζεται μόνο με την ακτίνα αναφοράς παράγονται τρεις ακτίνες με διαφορετική γωνία. Μια μηδενικής τάξης ή αλλιώς μη αποκλίνουσα και δύο πρώτης τάξης περιθλώμενες ακτίνες. Οι δύο τελευταίες αναπαράγουν αληθινά και φανταστικά είδωλα του αντικειμένου. Η αληθινή εικόνα είναι ψευδοσκοπική. Γι' αυτόν τον λόγο η φανταστική εικόνα (μη ψευδοσκοπική) είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές της ολογραφίας. Η διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 3.78 (b)**.

Η ένταση του φωτός στην ανακατασκευασμένη εικόνα εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της περίθλασης του ολογράμματος. Αυτή είναι συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων εγγραφής, ο πιο σημαντικός από τους οποίους είναι ο τύπος του φιλμ εγγραφής. Κάτω από ιδανικές συνθήκες, ζελατινοειδές ή πολυμερικό φιλμ τα οποία τροποποιούν μόνο τη φάση του φωτός, αναπαραγωγή χωρίς να το απορροφούν παρέχουν σχεδόν 100% ολογραφική αποτελεσματικότητα περίθλασης. Εμπορικά διαθέσιμες ολοκάμερες που κάνουν χρήση θερμοπλαστικών φασικών ολογραμμάτων, που μπορούν να αναπτυχθούν με θερμική διεργασία χωρίς τη μετακίνηση του φιλμ από το στήριγμά του, παρέχουν αποτελεσματικότητα περίθλασης μέχρι 20%. Πλάκες μαύρου ή άσπρου φιλμ υψηλής ανάλυσης που

χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό ολογραμμάτων απορρόφησης έχουν θεωρητική αποτελεσματικότητα μέχρι 6,25%.



Σχήμα 3.78 Βασικό οπτικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην ολογραφία συνεχούς κύματος. (α) Ολοκάμερα για την εγγραφή του ολογράμματος ενός αντικειμένου σε φωτογραφική πλάκα. (β) Οπτικό σύστημα ανακατασκευής της φανταστικής εικόνας του αντικειμένου από το ολόγραμμα της φωτογραφικής πλάκας.