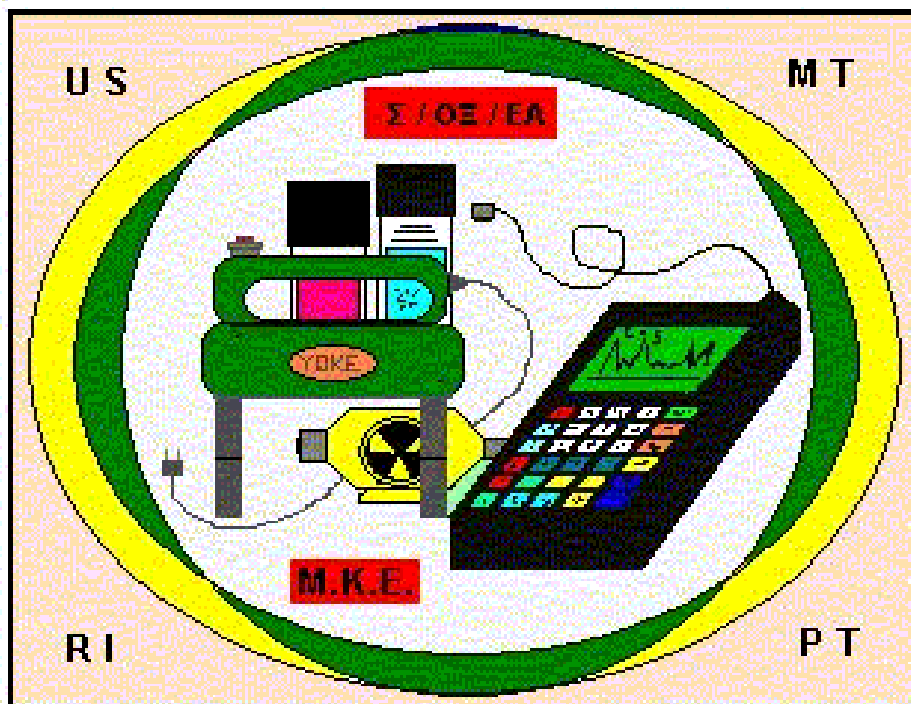


Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ:ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:  
ΛΙΑΚΟΣ ΠΕΤΡΟΣ  
ΖΑΦΕΙΡΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΣΥΝΤΖΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:  
Κ. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Λίγα λόγια ...

Η εργασία αυτή είναι μία προσπάθεια περισσότερο ερμηνείας των μεθόδων μη καταστροφικών ελέγχων, μηχανολογικών εγκαταστάσεων.

Ασφαλώς το θέμα αυτό είναι τεράστιο και δεν καλύπτεται μέσα σε λίγες σελίδες, όμως πιστεύουμε ότι είναι ένα δείγμα της προσπάθειας μας, στο χρόνο εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας το έτος 2008-2009. Βέβαια μεγάλο ρόλο συνέβαλαν και οι γνώσεις που αποκομίσαμε από το Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ.

Κατά την διάρκεια και ως την αποπεράτωση της εργασίας μας μεγάλο ρόλο έπαιξε η βοήθεια που είχαμε από τον καθηγητή μας κ. Ανδρέα Γιαννόπουλο και των συναδέλφων από το εργοστάσιο του αλουμινίου της Ελλάδος του τμήματος συντήρησης και ιδιαίτερα του κ. Ιωάννη Ψωμιάδη προϊστάμενο του τμήματος διεξαγωγής μη καταστροφικών ελέγχων, ανθρώπων που χωρίς προκατάληψη ήταν πρόθυμοι στην μετάδοση της γνώσης.

Έτσι θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην διεξαγωγή της εργασίας μας.

Μετά τιμής  
Λιάκος Πέτρος  
Συντζάκης Ιωάννης  
Ζαφείρας Παναγιώτης

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1. ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1.1 Εισαγωγή .....	5
1.2 Η Όραση.....	5
1.3 Το Φως.....	10
1.4 Χαρακτηριστικά των Δοκιμών που επηρεάζουν τον Έλεγχο.....	17
1.5 Εξοπλισμός .....	21

## 2. ΥΠΕΡΗΧΟΙ

2.1 Φυσική των Υπερήχων.....	29
2.2 Ανάκλαση και Διάβαση του Ήχου.....	36
2.3 Κεφαλές και Συσσκευές Υπέρηχων .....	38
2.4 Χαρακτηριστικά της Δέσμης Υπερήχων .....	43
2.5 Ευαισθησία και Διακριτική Ικανότητα .....	47
2.6 Μέθοδοι και Τεχνικές.....	50
2.7 Τεχνικές Συγκριτικής Αξιολόγησης Ασυνεχειών.....	52
2.8 Διεξαγωγή του Ελέγχου.....	53
2.9 Αξιολόγηση Των Χαρακτηριστικών Απόδοσης Εξοπλισμού Υπερήχων.....	55

## 3. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ

3.1 Εισαγωγή – Φυσική της Μεθόδου .....	57
3.2 Το Φαινόμενο της Σκέδασης.....	59
3.3 Ακτίνες -Χ .....	62
3.4 Ακτίνες -γ.....	67
3.5 Το ραδιογραφικό Φιλμ.....	76
3.6 Έννοιες και Νόμοι της Ραδιογράφησης .....	82

3.7 Ενισχυτικές Πλάκες .....	86
3.8 Άλλες Τεχνικές Απεικόνισης .....	89
3.9 Επεξεργασία του Φιλμ .....	92
3.10 Ελαττώματα του ραδιογραφήματος .....	98

#### **4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ**

4.1 Ιστορία της Μεθόδου .....	102
4.2 Το τριχοειδές Φαινόμενο .....	102
4.3 Εξόγκηση και Εμφανιστής .....	104
4.4 Φυσική της Μεθόδου .....	104
4.5 Τα Βήματα της Μεθόδου .....	104
4.6 Ερμηνεία Ενδείξεων .....	112
4.7 Δοκιμή Διαρροής με Χρήση Δ.Υ. ....	114
4.8 Έλεγχος Συστημάτων Υγρού Οξυγόνου (LOX) .....	114
4.9 Ορατές και Φθορίζουσες Βαφές .....	114
4.10 Ταξινόμηση Μεθόδων .....	119
4.11 Επιλογή Βέλτιστης Μεθόδου .....	121
4.12 Εικόνα των Ασυνεχειών .....	122
4.13 Υγιεινή και Ασφάλεια .....	123
4.14 Δοκίμια Ελέγχου (Test Blocks) .....	123

#### **5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

5.1 Εισαγωγή – Βασικές Έννοιες και Ιδιότητες .....	126
5.2 Φυσικές Έννοιες και Σχέσεις .....	132
5.3 Ταξινόμηση Υλικών .....	135
5.4 Σχέση Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού .....	139
5.5 Φυσική της Μεθόδου .....	142

5.6 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της Μεθόδου .....	147
5.7 Μέθοδοι και Τεχνικές .....	150
5.8 Τεχνικές Άμεσης Μαγνήτισης .....	156
5.9 Τεχνικές Έμμεσης Μαγνήτισης .....	160
5.10 Ορατά και Φθορίζοντα Σωματίδια.....	167
5.11 Απομαγνήτιση .....	171
5.12 Όργανα Μέτρησης Μαγνητισμού .....	173
5.13 Ερμηνεία Ενδείξεων .....	176
5.14 Μόνιμη Καταγραφή Ενδείξεων .....	180
5.15 Προ- και Μετα- Καθαρισμός .....	181
5.16 Προφυλάξεις Υγιεινής και Ασφάλειας .....	182
5.17 Έλεγχος των Υλικών και Λειτουργικοί Έλεγχοι.....	183
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>185</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για κάθε υλικό ή κατασκευή, η αντοχή, η ποιότητα και το μικρό κόστος, συνεπάγονται ποιοτικό έλεγχο με καταστροφικές και Μη Καταστροφικές Μεθόδους (ΜΚΜ), που πρέπει να διεξάγεται με δοκίμια σε διαπιστευμένο εργαστήριο, εξοπλισμένο με κατάλληλο εξοπλισμό και στελεχωμένο με κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

Οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) εξασφαλίζουν γρήγορο, αξιόπιστο, οικονομικό και ασφαλή έλεγχο, ιδιαίτερα στις κατασκευές υψηλού κινδύνου.

Ως ΜΚΕ θεωρείται η εξέταση ενός αντικειμένου με τεχνολογίες οι οποίες δεν επηρεάζουν τη μελλοντική του χρησιμότητα.

Ο όρος ΜΚΕ υπονοεί αριθμό μεθόδων, οι κυριότερες των οποίων είναι:

1. του οπτικού ελέγχου,
2. των υπερήχων,
3. της βιομηχανικής ραδιογραφίας,
4. των δεισδυτικών υγρών,
5. των μαγνητικών σωματιδίων

Με τις μεθόδους αυτές είναι δυνατόν:

- να ανιχνεύονται εσωτερικά ή εξωτερικά ελαττώματα των υλικών, που είναι και οι κύριες αιτίες αστοχίας τους,
- να προσδιορίζονται η δομή η σύνθεση ή οι ιδιότητες των υλικών
- να προσδιορίζονται αρκετές εκ των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (ελαστικές σταθερές, σκληρότητα των μετάλλων, αντοχές, κ.ά.),
- να υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών,
- να εφαρμόζονται στην Ιατρική για διαγνωστικούς σκοπούς

Οι ΜΚΕ μπορούν και πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις, του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός προϊόντος συμπεριλαμβανομένων της επιλογής των υλικών, της έρευνας και της ανάπτυξης, της συναρμολόγησης, του ποιοτικού ελέγχου όπως και της εγκατάστασης και της συντήρησης. Οι έλεγχοι αυτοί εκτελούνται σε πολλές περιπτώσεις, για διάγνωση ή θεραπεία, τόσο στα υλικά όσο και τις κατασκευές.

Οι ΜΚΕ συνιστούν σήμερα βασική προϋπόθεση ασφαλούς λειτουργίας και απόδοσης κάθε κατασκευής τόσο στη βιομηχανία όσο και σε σημαντικό μέρος από τα έργα κυρίως των Πολιτικού, Μηχανολόγου και Ναυπηγού Μηχανικού. Η μεγάλη σημασία και η συμβολή των ΜΚΕ στην ποιότητα και στην ασφάλεια των κατασκευών έχουν επιβάλλει την κατάρτιση και θέσπιση μεγάλου αριθμού εθνικών και διεθνών προτύπων, κανονισμών, κωδίκων με υψηλή επιστημονική και τεχνολογική στάθμη. Τα πρότυπα, οι κανονισμοί και οι κώδικες καλύπτουν όλο το φάσμα της εφαρμογής των ΜΚΕ στην βιομηχανία και στις κατασκευές (μέθοδοι, μέσα, διαδικασίες, εκπαίδευση, διαπίστευση εργαστηρίων και προσωπικού, κ.λ.π.).

Η ασφαλής εφαρμογή των μεθόδων αυτών, εκτός από τον κατάλληλο εξοπλισμό, απαιτεί πολύ καλά εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό από πιστοποιημένους και διαπιστευμένους φορείς, βάσει των εθνικών και διεθνών κανονισμών.

Σήμερα η διαπίστευση των κέντρων εκπαίδευσης, κατάρτισης και πιστοποίησης προσωπικού ΜΚΕ στην Ευρώπη γίνεται με βάση το πρότυπο ISO-EN/IEC 17024 ενώ η πιστοποίηση του προσωπικού με βάση τα πρότυπα EN 473 και ISO 97012.

Σε όλες τις χώρες και ιδιαίτερα στις χώρες της Ε.Ε. τη διαχείριση του έργου τούτου επιτελεί φορέας αντίστοιχος προς την ΕΛΕΜΚΕ. Οι φορείς αυτοί έχουν συσταθεί, όπως και η ΕΛΕΜΚΕ, από όλους τους εμπλεκόμενους με τους ΜΚΕ (βιομηχανία, προσωπικό ΜΚΕ, εργαστήρια ΜΚΕ, εκπαιδευτικά κέντρα, κλπ.). Είναι εθνικοί μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα, και ένας από κάθε χώρα συμμετέχει στις διεθνείς ενώσεις ΜΚΕ όπως είναι η ICNDT και EFNDT.

Όλες οι χώρες με αναπτυσσόμενη οικονομία και βιομηχανική παραγωγή χρησιμοποιούν τους ΜΚΕ εκτεταμένα, έχοντας ταυτόχρονα δημιουργήσει προς τούτο κέντρα εκπαίδευσης και πιστοποίησης του ασχολούμενου με τις μεθόδους αυτές προσωπικού, όπως και για τη διεξαγωγή της σχετικής έρευνας.

Δεν νοείται σήμερα διασφάλιση της Ποιότητας και ιδιαίτερα η εξασφάλιση της Ολικής Ποιότητας, χωρίς την εφαρμογή των ΜΚΕ.

Στο διεθνή χώρο έχει δημιουργηθεί η Διεθνής Επιτροπή ΜΚΕ, η ICNDT (International Committee for Non-Destructive Testing). Μέλη της ICNDT σήμερα είναι 71 εθνικές ενώσεις από όλο τον κόσμο. Η ICNDT ιδρύθηκε το 1955 στις Βρυξέλλες κατά τη διάρκεια του 1ου διεθνούς συνεδρίου ΜΚΕ.

Σκοποί της ICNDT είναι:

- να είναι ένας οργανισμός ΜΚΕ λειτουργώντας προς όφελος όλων των εμπλεκόμενων ενώσεων ΜΚΕ και των πολιτών,

- να προωθεί διεθνείς συνεργασίες σε οτιδήποτε σχετικό με τους ΜΚΕ,

- να ενθαρρύνει την ίδρυση, την ανάπτυξη και τη συνεργασία των εθνικών ενώσεων ΜΚΕ,

- να σχεδιάζει το παγκόσμιο συνέδριο ΜΚΕ, που διεξάγεται κάθε τέσσερα χρόνια, επιλέγοντας την κατάλληλη διοργανώτρια ένωση ΜΚΕ και πόλη διεξαγωγής και,

- να ενθαρρύνει τη δημιουργία διεθνών κανονισμών ΜΚΕ, σε συνεργασία με διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς τυποποίησης και άλλους φορείς.

Παράλληλα με την ICNDT στην Ευρώπη σήμερα έχει δημιουργηθεί η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία ΜΚΕ, η EFNDT (European Federation of Non-Destructive Testing), από τις εθνικές ενώσεις ΜΚΕ των Ευρωπαϊκών κρατών. Η EFNDT είναι ένα σωματείο μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα και ιδρύθηκε στις 25-5-1998 στη σύνοδο της Κοπεγχάγης, που έλαβε χώρα στα πλαίσια του 7ου Ευρωπαϊκού Συνεδρίου ΜΚΕ, στη θέση της ECNDT (European Committee for Non-Destructive Testing), η οποία τότε διελύθη, και η οποία είχε ιδρυθεί στη Φλωρεντία το 1984, κατά τη διάρκεια του 3ου Ευρωπαϊκού Συνεδρίου ΜΚΕ.

Σκοποί της Ομοσπονδίας (EFNDT) είναι η προώθηση όλων των θεμάτων που αφορούν τους ΜΚΕ, σε όλες τις χώρες που περιέχονται στη γεωγραφική περιοχή της Ευρώπης, όπως αυτή καθορίζεται από τα Ηνωμένα Έθνη, περιλαμβανομένων και:

1. της τεχνολογίας
2. της έρευνας
3. της ανάπτυξης
4. των εφαρμογών
5. της εκπαίδευσης
6. της πληροφόρησης

Η Ομοσπονδία είναι υπεύθυνη για την οργάνωση των Ευρωπαϊκών συστημάτων ΜΚΕ, για την πιστοποίηση ατόμων και οργανισμών ασχολούμενων με τους ΜΚΕ εναρμονίζοντας τα εθνικά συστήματα και εξασφαλίζοντας ότι αυτά λειτουργούν ικανοποιητικά.

Η EFNDT αριθμεί 27 μέλη, κάθε ένα των οποίων αποτελεί εθνικό φορέα ΜΚΕ αντίστοιχης Ευρωπαϊκής χώρας και διοργανώνει κάθε τέσσερα χρόνια το Ευρωπαϊκό



συνέδριο ΜΚΕ, σε διαφορετική Ευρωπαϊκή χώρα και από διαφορετική ένωση ΜΚΕ κάθε φορά.

Στην Ελλάδα σήμερα, περισσότερες από 80 επιχειρήσεις, όπως η Ε.Α.Β., η Ο.Α., τα Ναυπηγεία, τα διυλιστήρια, η Δ.Ε.Η., ο Ο.Σ.Ε., τα Πανεπιστήμια κ.ά., απασχολώντας πάνω από 1000 άτομα, χρησιμοποιούν τους ΜΚΕ. Η ζήτηση εξειδικευμένου προσωπικού ΜΚΕ όλο και αυξάνει. Το προσωπικό αυτό, για τον Ευρωπαϊκό χώρο, πρέπει να εκπαιδεύεται και να πιστοποιείται κατά EN 473, ISO 97012 από κατάλληλα εκπαιδευτικά και εξεταστικά κέντρα και άλλους διαπιστευμένους κατά ISO-EN/IEC 17024 προς τούτο φορείς.

# 1. ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection) είναι η παλαιότερη μέθοδος Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών (Non Destructive Testing, NDT/ΜΚΔ) αλλά συχνά θεωρείται σαν υποδεέστερη των άλλων. Βασικές αρχές είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουμε απλές αλλά και σύνθετες μεθόδους ελέγχου, χρησιμοποιώντας το ανθρώπινο μάτι σαν κύριο όργανο. Οι αρχές των οπτικών τεχνικών παρουσιάζονται κατωτέρω, σαν οδηγός για τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων αυτής της εξαιρετικά οικονομικής μεθόδου.

## 1.2 Η ΟΡΑΣΗ

### 1.2.1 Το Μάτι

Το ανθρώπινο μάτι είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο όργανο, το οποίο μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια (μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) σε ηλεκτρικούς παλμούς, οι οποίοι μεταφέρουν τις πληροφορίες στον εγκέφαλο. Ο Οπτικός Έλεγχος βασίζεται σε πολλές και διαφορετικές λειτουργίες του ματιού, άρα είναι απαραίτητη μία σύντομη περιγραφή αυτών των λειτουργιών, για να καταλάβουμε τις αρχές αυτού του ελέγχου.

Το μάτι είναι μία σφαίρα (βολβός) με διάμετρο 2,5 cm περίπου. Βρίσκεται μέσα στις οφθαλμικές κόγχες του μετώπου, όπου συγκρατείται με 6 μύες, που επιτρέπουν και την περιστροφή του. Τα τοιχώματα του βολβού του ματιού αποτελούνται από 3 στρώματα: Τον **Σκληρό Χιτώνα (sclera)**, που είναι αδιαφανής και άσπρος. Προς τα εμπρός κυρτώνεται και γίνεται διαφανής, αποτελώντας τον **Κερατοειδή Χιτώνα (cornea)**. Ο κερατοειδής καλύπτεται από βλεννώδες επιθήλιο. Το μεσαίο στρώμα είναι ο **Χοριοειδής Χιτώνας(chorea)**. Είναι πλούσιος σε αιμοφόρα αγγεία και περιβάλλει το μάτι, εκτός από μία μικρή περιοχή προς τα εμπρός, όπου αφήνει μία τρύπα, την **Κόρη (pupil)**. Το τμήμα του χοριοειδούς χιτώνα που αντιστοιχεί στον Κερατοειδή Χιτώνα είναι έγχρωμο και λέγεται **Ίριδα (iris)**. Η ίριδα δίνει το χαρακτηριστικό χρώμα στα μάτια μας (καφέ, γκρι, πράσινο, μπλε κ.λπ.) Το άνοιγμα της κόρης μεταβάλλεται με τη βοήθεια μυών, ανάλογα με τις μεταβολές της φωτεινής

έντασης, μεγαλώνοντας σε αμυδρό φωτισμό και μικραίνοντας σε πολύ φως, χωρίς τη θέληση μας.

Ο εσωτερικός χιτώνας είναι ο **Αμφιβληστροειδής (retina)**. Είναι το πιο σύνθετο και ευαίσθητο στρώμα που περιέχει τους **Φωτοδέκτες (receptors)**. Οι φωτοδέκτες είναι νευρικά κύτταρα και διακρίνονται σε δύο τύπους: **Κωνία (cones)** και **Ραβδία (rods)**. Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την όραση σε συνθήκες άπλετου φωτισμού (photopic vision) καθώς και για την αντίληψη των χρωμάτων. Υπάρχουν τρία είδη κωνίων στον αμφιβληστροειδή, που διεγείρονται σε μήκη κύματος 445 nm, 535 nm και 570 nm, τα οποία αντιστοιχούν στο απλό, πράσινο και κίτρινο χρώμα. Τα ραβδία είναι πολύ περισσότερα από τα κωνία, ευθύνονται για την όραση υπό σχετικό σκοτάδι (scotopic vision) και δεν μπορούν να διακρίνουν τα χρώματα. Ζώα που βλέπουν πολύ καλά στο σκοτάδι, το επιτυγχάνουν διότι έχουν πολύ περισσότερα ραβδία από τον άνθρωπο. Τα ραβδία είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητα από τα κωνία, διότι διεγείρονται με πολύ χαμηλότερη ένταση φωτός. Χρειάζεται όμως χρόνος προκειμένου να διεγερθούν, διότι απαιτείται πρώτα να παράγουν μια ειδική ουσία (Rhodopsin).

Πίσω από την κόρη υπάρχει ένας αμφίκυρτος φακός, ο **Κρυσταλλικός Φακός** ή απλώς **Φακός (lens)**. Οι μύες που συγκρατούν το φακό ονομάζονται **Μύες του Φακού (ciliary muscles)** και, μέσω αυτών, μεταβάλλονται οι διαστάσεις, το πάχος και η κυρτότητα του φακού, ώστε το εισερχόμενο φως να συγκεντρώνεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Η ικανότητα αυτή λέγεται **Προσαρμογή (accommodation)**. Πέρα από τις κινήσεις μεγάλης κλίμακας του ματιού, υπάρχουν και οι διαρκείς μικροκινήσεις (10-60 λεπτά του τόξου), που εκτελούνται αδιάλειπτα και ασυναίσθητα, ακόμα και όταν νομίζουμε ότι τα μάτια μας είναι ακίνητα.

Μπροστά από τον φακό βρίσκεται το **Υδατοειδές Υγρό (aqueous humor)** και πίσω από αυτόν το **Υαλώδες Σώμα (vitreous body)**, που γεμίζει το εσωτερικό του βολβού.

Απέναντι από την κόρη και πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα βρίσκεται η πιο ευαίσθητη στο φως περιοχή, η **Ωχρή Κηλίδα (Fovea Centralis)**. Το οπτικό νεύρο μπαίνει στο βολβό από μία θέση λίγο πιο χαμηλά από την ωχρή κηλίδα, που λέγεται **Οπτική Θηλή** είτε **Τυφλό Σημείο (blind spot)**. Το τυφλό σημείο δεν περιέχει καθόλου φωτοδέκτες.

Το φως εστιάζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, μέσω της προσαρμοστικής ικανότητας του ματιού και εκεί διεγείρονται οι φωτοδέκτες. Η διέγερση μεταβιβάζεται

στο οπτικό νεύρο και από εκεί στο οπτικό κέντρο του εγκεφάλου. Εκεί συνειδητοποιούμε την εικόνα, έχοντας την αίσθηση ότι τη βλέπουμε με τα μάτια μας.

Κατά την προσαρμογή του φακού και προκειμένου να δούμε ένα κοντινό αντικείμενο, οι μύες του φακού τον συμπιέζουν ώστε να μεγαλώσει το πάχος του. Αντίθετα, προκειμένου να δούμε ένα μακρινό αντικείμενο, οι μύες του φακού χαλαρώνουν και ο φακός λεπταίνει.

Τα κωνία βρίσκονται κυρίως στη μεσαία περιοχή του αμφιβληστροειδούς, γύρω από την Ωχρή Κηλίδα. Όσο απομακρυνόμαστε από αυτή, υπάρχουν κωνία και ραβδία, με τα ραβδία συνεχώς να αυξάνονται και τελικώς να βρίσκονται μόνον αυτά στην εξωτερική περιφέρεια του αμφιβληστροειδούς.

Η όραση υπό συνθήκες φωτός (photopic vision/foveal vision) απαιτεί τουλάχιστον  $3 \text{ cd/m}^2$  ενώ η όραση υπό συνθήκες σκότους (scotopic vision) μόνον  $3 \times 10^{-5} \text{ cd/m}^2$  αλλά χρειάζονται 30-45 λεπτά της ώρας για πλήρη προσαρμογή και βέβαια δεν μπορεί να μας δώσει την αίσθηση των χρωμάτων.

Εάν εστιάσουμε την όραση μας σε ένα αντικείμενο μεγέθους 19mm τοποθετημένο σε απόσταση 500 mm, η εικόνα του πέφτει ακριβώς επάνω στην Ωχρή Κηλίδα. Η όραση αντικειμένων μεγαλύτερων από 19 mm γίνεται με συνεχείς και στιγμιαίες κινήσεις των ματιών.

Ικανότητα διάκρισης των αποστάσεων (στερεοσκοπική όραση) γίνεται μόνο με διοφθαλμική όραση, δηλαδή με χρήση και των δύο ματιών, οπότε, λόγω των ελαφρά διαφορετικών εικόνων που συλλαμβάνουν τα μάτια μας, ο εγκέφαλος αντιλαμβάνεται τις σχετικές αποστάσεις των αντικειμένων.

Στερεοσκοπική όραση υπάρχει σε μεγεθύνσεις έως  $\times 2$  ενώ σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις χάνεται.

Πολλές λειτουργίες του ανθρώπινου ματιού μπορούν να συγκριθούν με αυτές μιας φωτογραφικής μηχανής.

### 1.2.2 Περιορισμοί και Ανωμαλίες στην όραση

Η μονοφθαλμική (monocular) όραση προφανώς περιορίζει την αντίληψη βάθους που μπορούμε να έχουμε. Υπάρχουν όμως και άλλοι παράγοντες που μπορούν να ελαττώσουν την οξύτητα της όρασης. Ένας από αυτούς είναι η ηλικία: Ένα ηλικιωμένο άτομο αντιλαμβάνεται καλύτερα το φως στο ανώτερο άκρο του φάσματος (μπλε) ενώ ένα νέο στο κατώτερο (κόκκινο).

Η ανικανότητα διάκρισης των χρωμάτων (**αχρωματοψία, colour blindness**) επηρεάζει πολλούς ανθρώπους σε διάφορους βαθμούς αλλά για τις περισσότερες εργασίες οπτικού ελέγχου δεν είναι απαγορευτική, διότι είναι περισσότερο χρήσιμη η ικανότητα διάκρισης της σκίασης και της αντίθεσης. Η ικανότητα αντίληψης των χρωμάτων είναι βέβαια απαραίτητη για ορισμένες εργασίες, όπως ο έλεγχος του χρωματισμού (μπογιάς), η παρατήρηση της θερμοκρασίας μέσω αλλαγής χρώματος είτε ο έλεγχος ηλεκτρικών κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν σύρματα με διάφορα χρώματα. Η κακή αντίληψη των χρωμάτων μπορεί να είναι κληρονομική είτε να προέρχεται από διάφορες καταστάσεις (κακής) υγείας είτε ακόμη και από τη διατροφή.

Οι διαταραχές της όρασης συνήθως είναι δύο ειδών, **Μυωπία** (myopia) είτε **Υπερμετρωπία** (Hypermetropia). Κατά την μυωπία, το φως εστιάζεται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα και δεν μπορούμε να δούμε ευκρινώς τα μακρινά μας αντικείμενα. Η μυωπία οφείλεται σε μόνιμη αύξηση του πάχους του φακού.

Κατά την υπερμετρωπία, το φως εστιάζεται πίσω από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα και δεν μπορούμε να δούμε ευκρινώς τα κοντινά μας αντικείμενα.

Η **Πρεσβυωπία** είναι κατάσταση όμοια με την υπερμετρωπία, μόνο που οφείλεται στην ηλικία και τη μερική απώλεια της ελαστικότητας του φακού, ώστε να μη μπορεί να αυξήσει το πάχος του όσο χρειάζεται για να εστιάσει κοντινά αντικείμενα.

Όλα τα ανωτέρω διορθώνονται με χρήση φακών (συνήθη γυαλιά είτε φακοί επαφής).

### 1.2.3 Απαιτήσεις Όρασης και Υπευθυνότητα του Εργοδότη

Τα σύγχρονα συστήματα πιστοποίησης απαιτούν ελέγχους τόσο της οξύτητας κοντινής όρασης όσο και της διάκρισης των χρωμάτων τουλάχιστον κάθε 12 μήνες. Η υπευθυνότητα για τη συμμόρφωση με τις σχετικές απαιτήσεις ανήκει στον εργοδότη. Ως εργοδότης νοείται ο Οργανισμός για τον οποίον εργάζεται κανείς σε μόνιμη βάση. Εργοδότης μπορεί να είναι ακόμη και το ίδιο το άτομο που ελέγχεται.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι Απαιτήσεις Οξύτητας Όρασης (Visual Acuity Requirements) για τα κυριότερα διεθνή σχήματα πιστοποίησης.

**PCN** Κοντινή Όραση: Jaeger No 1 σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 300 mm.

Αντίληψη χρωμάτων: Έγχρωμες πλάκες Ishihara και επίδειξη ικανότητας διαφοροποίησης των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο ελέγχου.

Συχνότητα: Ετησίως

**EN473** Κοντινή Όραση: Jaeger No 1 σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 300 mm.

Αντίληψη χρωμάτων: Αρκετή ώστε να διακρίνεται η αντίθεση μεταξύ των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο, όπως καθορίζονται από τον εργοδότη.

Συχνότητα: Ετησίως

**ISO9712** Κοντινή Όραση: No 2 σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 300mm

Μακρινή Όραση: 20/30 κατά Snellen είτε καλύτερη, τουλάχιστον στο ένα μάτι.

Αντίληψη χρωμάτων: Αρκετή ώστε να διακρίνεται η αντίθεση μεταξύ των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο.

Συχνότητα: Δύο φορές το χρόνο

#### **ASNT**

**SNT-TC-1A** Κοντινή Όραση: Jaeger No 2 σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από 305

mm

Αντίληψη χρωμάτων: Αρκετή ώστε να διακρίνεται η αντίθεση μεταξύ των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο.

Συχνότητα: Κοντινή Όραση, Ετήσια

Χρωματική αντίληψη κάθε 3 χρόνια

## 1.3 ΤΟ ΦΩΣ

### 1.3.1 Βασικές Ιδιότητες του Φωτός

Το φως ορίζεται σαν ενέργεια ακτινοβολίας που διεγείρει τον αμφιβληστροειδή και παράγει το αίσθημα της όρασης. Το ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εκτείνεται από 380-770 nm(ανάλογα με το κάθε άτομο, υπάρχει μικρή διακύμανση).

Όλες οι μορφές ακτινοβολίας έχουν την ίδια ταχύτητα στο κενό (299.793 km/sec) αλλά μπορεί να διαφέρουν στο μήκος κύματος και επομένως στη συχνότητα. Το μήκος κύματος και η ταχύτητα καθορίζονται από το μέσο στο οποίο διαδίδεται η ακτινοβολία αλλά η συχνότητα παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από το μέσο.

Ταχύτητα = συχνότητα επί μήκος κύματος:

$$c = f \times \lambda \quad (1.1)$$

όπου: c=ταχύτητα διάδοσης, f=συχνότητα και λ=μήκος κύματος.

Το φως παράγεται όταν ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο διεγείρεται και μεταπηδά σε ανώτερη, υψηλότερης ενέργειας τροχιά. Με την επιστροφή του στην κανονική τροχιά του, εκπέμπει τη διαφορά ενέργειας υπό μορφή «πακέτου ενέργειας» ή φωτονίου.

$$E_1 - E_2 = h \times f \quad (1.2)$$

όπου  $E_1$  και  $E_2$  η ανώτερη και η κανονική ενεργειακή στάθμη αντίστοιχα, h η σταθερά του Planck και Γη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός.

Οι πηγές φωτός εκπέμπουν ακτινοβολία σε ορισμένο εύρος μήκους κύματος. Η ανάλυση του φάσματος του φωτός δίνει μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε ορισμένα χρώματα : κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε, βαθύ μπλε (indigo) και ιώδες (βιολετί).

**Πίνακας 1.1:** Μήκη Κύματος

Υπεριώδες κενού:	Κάτω από 185 nm
Υπεριώδες:	185 έως 385 nm
Ιώδες:	385 έως 450nm
Μπλε:	450 έως 480nm
Μπλε - Πράσινο:	480 έως 510nm
Πράσινο:	510έως550nm
Κίτρινο - Πράσινο:	550 έως 570nm
Κίτρινο:	570 έως 590nm
Πορτοκαλί:	590 έως 630nm
Κόκκινο:	630 έως 770nm
Υπέρυθρο:	Πάνω από 770 nm

Το βαθύ μπλε (indigo) μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ του μπλε και του ιώδους, με μήκος κύματος 430 έως 455 nm περίπου. Συνήθως όμως παραλείπεται από το φάσμα του φωτός. Η απόκριση του ανθρώπου στο φωτεινό φάσμα φαίνεται στο παρακάτω γράφημα. Η μέγιστη απόκριση και ευαισθησία τοποθετείται στο κίτρινο-πράσινο φως, περί τα 570.

Όταν έχουμε εκπομπή ενός μόνο μέρους του φωτεινού φάσματος και μάλιστα συγκεκριμένου μήκους κύματος, τότε μιλούμε για **μονοχρωματική (monochromatic)** ακτινοβολία.

Εν γένει όμως οι φωτεινές πηγές εκπέμπουν σύνθετο φως, αποτελούμενο από διάφορα μήκη κύματος (χρώματα). Για να χαρακτηρίσουμε το εκπεμπόμενο φάσμα, χρησιμοποιούμε τη θερμοκρασία ενός «**μαύρου σώματος**» (**black body**) που εκπέμπει φως ίδιας φασματικής ανάλυσης με τη δική μας πηγή. Η θερμοκρασία αυτή καλείται «**θερμοκρασία χρώματος**» (**colour temperature**) και μετράται σε βαθμούς Kelvin(°K).

Έτσι, το φάσμα του φωτεινού μπλε ουρανού αντιστοιχεί σε 10.000 °K, οι συνήθεις λάμπες φθορισμού σε 5.000°K (αλλά υπάρχει μεγάλη ποικιλία) και μία λάμπα πυρακτώσεως 100 W σε 3.000°K περίπου.



Αυτό δεν είναι επιθυμητό, όταν διεξάγεται οπτικός έλεγχος, που βεβαίως βασίζεται και στη διαφορά χρώματος είτε χρωματικού τόνου των εξεταζόμενων περιοχών. Έτσι, για τον αρτιότερο οπτικό έλεγχο, χρησιμοποιούνται ακριβές πηγές φωτός, με χρήση περιστρεφόμενων δίσκων με οπές, ώστε να αλλάζει η ένταση χωρίς να αλλάζει και το εκπεμπόμενο φάσμα.

### 1.3.2 Φωτομετρία

Η μέτρηση των χαρακτηριστικών του φωτός μπορεί να γίνει με χρήση των ακόλουθων συστημάτων μέτρησης: φωτοβολταϊκά στοιχεία, φωτοαγωγιμα στοιχεία, φωτοηλεκτρικοί σωλήνες, φωτοδίοδοι και φωτοτρανζίστορ. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν και συσκευές οπτικής σύγκρισης.

Τα **φωτοβολταϊκά στοιχεία (photovoltaic cells)** λειτουργούν μέσω απορρόφησης της ενέργειας των φωτονίων (διακριτών ποσοτήτων φωτός) και αντίστοιχης παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από μία μεταλλική επιφάνεια καλυμμένη με δύο στρώματα ημιαγωγίου υλικού (π.χ. σελήνιο είτε πυρίτιο). Με την απορρόφηση της ενέργειας του φωτονίου, ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο στη σύνδεση ρ-η των ημιαγωγών. Το μέταλλο συνδέεται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, ώστε να υπάρξει ροή ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να κινήσει ένα μικρό αμπερόμετρο και έτσι να μετρηθεί η φωτεινή ενέργεια.

Τα **φωτοαγωγιμα στοιχεία (photoconductive cells)** λειτουργούν μέσω της αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης του στοιχείου, σαν αποτέλεσμα της απορρόφησης φωτονίων. Εάν εφαρμόσουμε εξωτερική τάση, η ένταση του ρεύματος (που αλλάζει με την ηλεκτρική αντίσταση του στοιχείου) μετρούμενη με ένα μικροαμπερόμετρο, μας δίνει ένδειξη του φωτός.

Φωτοαγωγιμα στοιχεία από cadmium sulfide και cadmium selenide μπορούν να μετρήσουν πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός. Στοιχεία από Γερμάνιο είναι ευαίσθητα σε μεγάλο εύρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση υπεριώδους έως και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι συσκευές με φωτοβολταϊκά είτε φωτοαγωγιμα στοιχεία καλούνται συνοπτικά φωτοηλεκτρικές συσκευές.

Οι **φωτοηλεκτρικοί σωλήνες (photoelectric tubes)** βασίζονται στην εκπομπή ηλεκτρονίων από μία επιφάνεια που βομβαρδίζεται με φωτόνια. Η επιφάνεια αυτή συνδέεται σαν ηλεκτρική κάθοδος, ενώ μία άνοδος συλλέγει τα ηλεκτρόνια, παράγοντας έτσι ένα ηλεκτρικό ρεύμα, μετρούμενο με ένα αμπερόμετρο.

Τα **φωτοτρανζίστορς και οι φωτοδίοδοι** βασίζονται σε διεπιφάνειες στερεάς κατάστασης παρόμοιες με αυτές των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αυτές οι συσκευές στερεάς κατάστασης (solid state) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθούν πολύ μικροί παλμοί ενέργειας.

Η μέτρησης του φωτός και των χαρακτηριστικών του λέγεται **Φωτομετρία (Photometry)**. (Οι συσκευές μετρήσεων βασίζονται σε μία από τις παραπάνω αρχές.

Οι συσκευές που μετρούν χαρακτηριστικά του ορατού φωτός καλούνται συνήθως φωτόμετρα (photometer) ενώ οι συσκευές που μετρούν χαρακτηριστικά εν γένει εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καλούνται **ραδιόμετρα (radiometer)**, όπως για παράδειγμα οι συσκευές που μετρούν την ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας μίας λυχνίας μαύρου φωτός (black light lamp) σε  $\text{mW/cm}^2$ . Προκειμένου για τα φωτόμετρα, είναι βασικό να διεγείρονται στο φωτεινό φάσμα όπως ακριβώς το ανθρώπινο μάτι και γι' αυτόν το λόγο έχει ιδιαίτερη σημασία το είδος του φωτοευαίσθητου υλικού αλλά και η χρήση διορθωτικών φίλτρων.

### 1.3.3 Βασικά Μεγέθη και Μονάδες της Φωτομετρίας

- **Ένταση Φωτεινής Πηγής (luminous intensity).**

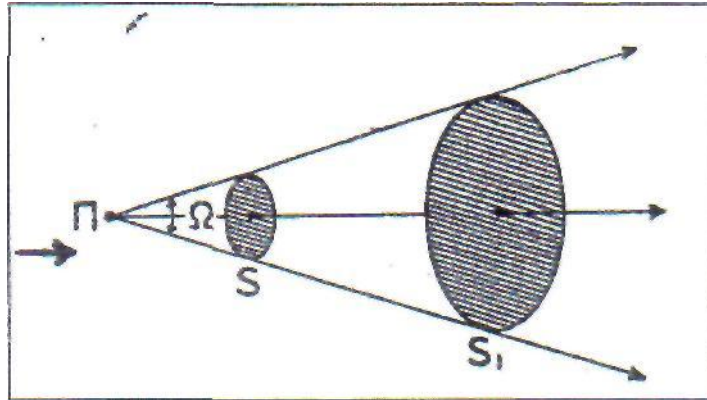
Είναι η φωτεινή ισχύς μιας πηγής, συγκρινόμενη με μία πρότυπη πηγή. Μονάδα μέτρησης το κηρίο (είτε καντέλα, candela, cd)

Ορίζεται επίσης και σαν η φωτεινή ροή ανά μονάδα στερεάς γωνίας

- **Φωτεινή Ροή (luminous flux)**

Προκύπτει από την ένταση της πηγής επί την στερεά γωνία στην οποία εκπέμπεται φως. Μετράται σε lumen ( $1\text{lm}=1\text{sterad}\times 1\text{cd}$ ).

Για συγκεκριμένο μήκος κύματος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επομένως μπορεί να αντιστοιχιστεί με Watt.



**Εικόνα 1.1:** Φωτεινή Ροή: Από τις επιφάνειες S και S διέρχεται η αυτή φωτεινή ροή

- **Φωτισμός Επιφάνειας (illuminance-illumination)**

Καλείται η φωτεινή ροή που προσπίπτει κάθετα στη μονάδα εμβαδού μιας επιφάνειας. Μετράται σε lux (=lumen/m<sup>2</sup>)

- **Λαμπρότητα Πηγής (luminance)**

Για μη σημειακές πηγές φωτός, η ένταση της πηγής ανά μονάδα επιφανείας της. Μονάδα μέτρησης: cd/m<sup>2</sup>

- **Αντίθεση (contrast)**

Είναι η διαφορά ανάμεσα στην ποσότητα του φωτός που ανακλάται από ένα παρατηρούμενο σώμα (είτε διαδίδεται μέσα από αυτό) και στο περιβάλλον το σώμα φως.

- **Χρώμα (colour)**

Είναι η αίσθηση με την οποία το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται τη διαφορά ανάμεσα στη φωτεινή ένταση (φωτεινότητα) είτε το μήκος κύματος (τόνος). Δεν υπάρχει μονάδα μετρήσεως, παρότι το μήκος κύματος μετράται σε μέτρα, νανόμετρα (nm).

### • Νόμος αντίστροφων τετραγώνων (inverse square law)

Ο φωτισμός (illumination) μιας επιφάνειας είναι κατ' ευθείαν ανάλογος της έντασης της πηγής (luminous intensity) και αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της απόστασης από μία πηγή.

$$E = I/d^2 \quad (1.3)$$

όπου E= Φωτισμός της επιφάνειας (lux) I=Ένταση φωτεινής πηγής (cd) d=απόσταση πηγής-επιφάνειας (m)

Ο νόμος είναι ακριβής όταν η απόσταση d είναι τουλάχιστον πενταπλάσια από την διάσταση της πηγής και εφόσον η επιφάνεια είναι κάθετη προς τη διεύθυνση των ακτίνων.

Για να υπολογίσουμε τον φωτισμό  $E_2$  σε μία επιφάνεια απόστασης  $d_2$  από την πηγή, όταν είναι γνωστός ο φωτισμός  $E_1$  σε μία απόσταση  $d_1$ , από αυτήν, εφαρμόζουμε την εξίσωση:

$$E_1/E_2 = d_2^2/d_1^2 \quad (1.4)$$

Μεταβολή του φωτισμού με την απόσταση

### • Φωτισμός επιφάνειας υπό γωνία (Lambert cosine law)

Εάν οι φωτεινές ακτίνες σχηματίζουν γωνία  $\theta$  με την κάθετο στην επιφάνεια, ο φωτισμός της επιφάνειας δίνεται από τον τύπο:

$$E = I \cdot \cos \theta / d^2 \quad (1.5)$$

#### 1.3.4 Επίπεδα Φωτισμού

Απαιτούνται επαρκή επίπεδα φωτισμού για να είναι εξασφαλισμένη η ανίχνευση μικρών ασυνεχειών. Υπερβολικός φωτισμός μπορεί να οδηγήσει σε γρήγορη κόπωση των ματιών του επιθεωρητή. Πολλοί κώδικες και προδιαγραφές προδιαγράφουν συγκεκριμένα επίπεδα φωτισμού για τις εργασίες οπτικού ελέγχου, αν και όχι απαραίτητα τα βέλτιστα επίπεδα. Η υφή της επιφάνειας, το χρώμα, η αντίθεση και η ανακλαστικότητα είναι πρωταρχικοί παράγοντες που καθορίζουν τα επίπεδα φωτισμού αλλά και το φάσμα της απαιτούμενης πηγής φωτός.

Επιφάνειες με υψηλό δείκτη ανάκλασης ενδέχεται να επιθεωρούνται χωρίς πρόβλημα σε επίπεδα φωτισμού 150 lux ενώ σκούρες ματ επιφάνειες μπορεί να χρειάζονται 3000 lux για να είναι ορατές μικρές ασυνέχειες. Γι' αυτό το λόγο πολλές προδιαγραφές απαιτούν τεχνικές που επαληθεύουν, μέσω δοκιμών επάρκειας, την καταλληλότητα του φωτισμού για τη διεξαγωγή οπτικού ελέγχου.

Γενικά πρότυπα οπτικού ελέγχου, μεταξύ των οποίων πρότυπα EN, BS, AWS και του Κώδικα ASME, απαιτούν τουλάχιστον 160 lux για γενικές εργασίες και τουλάχιστον 500 lux για κρίσιμες εργασίες. Οι προδιαγραφές κατά AWS για οπτικό έλεγχο συγκολλήσεων απαιτούν 1070 lux για κρίσιμους ελέγχους.

### **1.3.5 Τεχνικές Φωτισμού**

Οι μέθοδοι φωτισμού συχνά υπαγορεύονται από το περιβάλλον του ελέγχου. Πρέπει να δίνεται προσοχή στην πρόσβαση, τη γωνία παρατήρησης, την υφή της επιφάνειας, την ανακλαστικότητα του δοκιμίου, τον περιβάλλοντα φωτισμό, το χρώμα του δοκιμίου και τη μέθοδο παρατήρησης. Κινούμενοι ή περιστρεφόμενοι στόχοι μπορεί να χρειάζονται φως που αναβοσβύνει, για να δώσουν μία τεχνητή αίσθηση ακινησίας. Ενδέχεται να χρησιμοποιούνται πολλαπλές πηγές φωτισμού για να ελαττωθούν οι σκιάσεις, αν και ορισμένες τεχνικές παρατήρησης χρησιμοποιούν τις σκιάσεις για να παρατηρηθούν καλύτερα ορισμένες περιοχές του δοκιμίου.

Ο άμεσος (direct) οπτικός έλεγχος, με παρατήρηση κάθετα στην επιφάνεια, συνοδεύεται με φωτισμό έως 45° από την κατακόρυφο. Αντίστροφα, μπορεί να έχουμε παρατήρηση υπό γωνία, με το φως να πέφτει κάθετα στην επιφάνεια. Πρέπει να τοποθετείται η πηγή έτσι ώστε να μη παράγεται άμεση ανάκλαση πάνω στο δοκίμιο. Επίσης, το άμεσο θάμπωμα-γυάλισμα (glare) από μία πηγή πρέπει να αποφεύγεται για να μη δημιουργείται κακή προσαρμογή του ματιού στις συνθήκες φωτισμού και να μην ελαττώνεται η ευαισθησία του ελέγχου.

Ενδέχεται να απαιτείται φωτισμός από απόσταση ή καθοδηγούμενος φωτισμός, για θέσεις με περιορισμένη πρόσβαση (π.χ. Οδηγοί φωτός με οπτικές ίνες). Οι αρχές του άμεσου φωτισμού ισχύουν και πάλι, με τον βέλτιστο φωτισμό κάθετα στην επιφάνεια.

Η υφή (texture) της επιφάνειας και η τοπογραφία της μπορούν να ενδυναμωθούν με φωτισμό υπό μικρή γωνία. Αυτή η τεχνική δίνει έμφαση στις κοιλότητες, ρίχνοντας σκιές και χρησιμοποιείται συχνά για την εύρεση υποκοπής

(undercut) σε συγκολλήσεις. Παρόμοια, η κοιλότητα στη ρίζα (root concavity) είτε η υπερβολική ρίζα (convexity) μπορούν να παρατηρηθούν στη ρίζα συγκόλλησης σωλήνων, όταν εργαζόμαστε με ένα ενδοσκόπιο και εκμεταλλευόμαστε τις σκιάσεις. Η παρατήρηση έγχρωμων αντικειμένων μπορεί να σημαίνει και χρωματική παρατήρηση ορισμένων ασυνεχειών. Χρησιμοποιώντας πηγές με συγκεκριμένο φάσμα, μπορούμε να επιτύχουμε βέλτιστη αντίθεση.

## **1.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ**

### **1.4.1 Καθαριότητα**

Ο οπτικός έλεγχος ενός αντικειμένου επηρεάζεται αρνητικά από τη «μόλυνση» (contamination) της επιφάνειας αλλά ορισμένες ασυνέχειες αφήνουν σημαντικές ενδείξεις σκουριάς. Γι' αυτό, το χρονικό στάδιο του ελέγχου και η μέθοδος προκαθορισμού έχουν μεγάλη σημασία. Εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται συνεχώς και απαιτούν τακτό περιοδικό έλεγχο, πρέπει να ελέγχονται πριν απομακρυνθεί κάθε επιφανειακή σκουριά. Η οξειδωση, υπό μορφή χαλαρής λεπτής επιφάνειας, νιφάδας (flake) ή σκόνης μπορεί να δώσει ένδειξη μέσω χρώματος, υψής είτε θέσης. Ένα παράδειγμα είναι η περίπτωση διάβρωσης τύπου «fretting», η οποία συχνά φαίνεται σαν καστανο-κόκκινη λάσπη (ή χρώματος κακάου) στην ένωση δύο μερών. Η ένδειξη αυτή αναγνωρίζεται εύκολα αλλά θα απομακρυνθεί, εάν προκαθοριστεί το δοκίμιο. Τα βαμμένα δοκίμια συχνά επιθεωρούνται οπτικά ψάχνοντας για σχισμές στο χρώμα, πράγμα που αποδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω ελέγχου, για ασυνέχειες κάτω από τη μπογιά.

Ο έλεγχος των δοκιμίων, μετά από τον προκαταρκτικό έλεγχο, πρέπει να γίνεται μετά τον καθαρισμό τους. Η χρήση σκληρής συρμάτινης βούρτσας είναι κατάλληλη για πολλά οξειδωμένα φερριτικά αντικείμενα αλλά μπορεί να είναι καταστροφική για μαλακά κράματα. Ο χημικός καθαρισμός για την απομάκρυνση ελαίων-λιπών είναι επίσης χρήσιμος, αλλά πρέπει να δίνεται προσοχή στη χρήση συμβατών (compatible) υλικών καθαρισμού, ανάλογα με το υλικό του δοκιμίου και τη λειτουργία που επιτελεί. Τα χυτά μπορεί να αμμοβοληθούν πριν από τον οπτικό έλεγχο και να απαλλαγούν από τα ίχνη της τροφοδοσίας και ανατροφοδοσίας. Το τρόχισμα με σκληρό υλικό πρέπει να αποφεύγεται, διότι έτσι μπορεί να κλείσουν επιφανειακά λεπτές ασυνέχειες. Για κρίσιμες εφαρμογές, συνιστάται να τεκμηριώνονται οι μέθοδοι

προκαθορισμού, ώστε να υπάρχει πάντοτε προτυποποιημένος τρόπος εργασίας με χρήση συμβατών τεχνικών.

Η μακρό- και μικρό-ανάλυση των δοκιμίων περιλαμβάνει λείανση (polishing) της επιφάνειας και χημική προσβολή της (etching) για να φανεί η δομή του υλικού. Οι χημικές ουσίες και τα αντιδραστήρια επιλέγονται ώστε να είναι συμβατά με το υλικό και τη μελλοντική χρήση του.

#### **1.4.2 Χρώμα**

Το χρώμα της επιφάνειας επηρεάζει την αντίθεση και την ανακλαστικότητα (δείκτη ανάκλασης), οι οποίοι καθορίζουν τις τεχνικές φωτισμού της επιφάνειας. Επιφάνειες ματ απαιτούν υψηλό επίπεδο φωτισμού, για να φανούν μικρές ασυνέχειες. Καφετιές διαβρωμένες επιφάνειες δεν ευνοούν την εύρεση μικρών ασυνεχειών, λόγω μικρής αντίθεσης, ενώ καθαρές καφέ επιφάνειες δίνουν μεγάλο λόγο αντίθεσης, ευνοώντας την ανίχνευση.

Το λευκό φως μπορεί να μην είναι το καλύτερο όταν παρατηρούμε χρωματιστές επιφάνειες. Η χρήση πρωτογενών πηγών φωτός είτε φιλτραρισμένου μονοχρωματικού φωτός μπορεί να δώσει σοβαρά πλεονεκτήματα.

#### **1.4.3 Κατάσταση της Επιφάνειας**

Η γενική κατάσταση της επιφάνειας ενός δοκιμίου ακόμη και εν ώρα λειτουργίας, μπορεί να περιέχει πληροφορίες που συχνά μένουν απαρατήρητες. Φούσκωμα (bulging) είτε παρουσία φυσαλίδων (bubbling) μπορεί να σημαίνει διάφορα είδη διάβρωσης (π.χ. φλύκταινα υδρογόνου και διάβρωση σχισμών αντίστοιχα). Μικρά τεμάχια μπόγιας είτε οδοντώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω ελέγχους είτε άλλες μεθόδους ΜΚΔ.

Ο έλεγχος συστημάτων που περιέχουν υγρά συχνά συγκεντρώνεται στην ανίχνευση διαρροής. Υγρά με χαμηλό ιξώδες (low viscosity - λεπτόρρευστα) όπως για παράδειγμα το πετρέλαιο, απλώνουν σε πολύ μεγάλη επιφάνεια, ακόμη και για μικρές απώλειες. Αυτό εμποδίζει τον εντοπισμό του σημείου διαρροής, έως ότου γίνει ο κατάλληλος καθαρισμός. Ψευδείς ενδείξεις, κατά την επιθεώρηση συστημάτων νερού, μπορεί να προέρχονται από συμπύκνωση υδρατμών, λόγω υγρασίας και θερμοκρασιακής διαφοράς. Ο ελεγκτής πρέπει επομένως να έχει καλή γενική γνώση

των υλικών και των συστημάτων που ελέγχει, για να λαμβάνει υπόψη του όλα τα δεδομένα, την ώρα της παρατήρησης και αξιολόγησης των πραγματικών συνθηκών.

#### **1.4.4 Σχήμα και Μέγεθος**

Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου που επηρεάζουν την ποιότητα του ελέγχου είναι το σχήμα και το μέγεθος του δοκιμίου. Περιορισμένη πρόσβαση λόγω γεωμετρίας του δοκιμίου είναι ένα προφανές πρόβλημα που ενδέχεται να επιλύεται με λιγότερο προφανείς τρόπους. Οι μεγάλες επιφάνειες μπορεί να μην εξεταστούν αποτελεσματικά, απλά και μόνον από έλλειψη συστηματικού σχεδίου ελέγχου. Παρατήρηση υπό κλίση αλλοιώνει την εικόνα και η απόσταση μεγαλώνει με την αύξηση της γωνίας παρατήρησης, όταν κοιτάζουμε από πάνω είτε από κάτω μια μεγάλη επιφάνεια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο οπτικός έλεγχος ενός μεγάλου πλοίου. Ρήγματα μήκους 500mm δεν έχουν ανιχνευθεί λόγω μεγάλης γωνίας και μεγάλης απόστασης παρατήρησης.

Ο οπτικός έλεγχος γενικά είναι λιγότερο χρονοβόρος από άλλες μεθόδους ΜΚΔ.

Αυτό προξενεί εφησυχασμό προκειμένου για μεγάλες και επαναλαμβανόμενες εργασίες, πράγμα που οδηγεί στη μη ανίχνευση των ασυνεχειών. Ο συστηματικός έλεγχος, η επιλογή των περιοχών ελέγχου, οι κατάλληλες γωνίες παρατήρησης και οι μικρές αποστάσεις είναι σημαντικοί παράγοντες για να επιτύχουμε έλεγχο υψηλής αξιοπιστίας.

Περίπλοκα αντικείμενα με μικρά ανοίγματα ενδέχεται να απαιτούν μεγέθυνση, καθρέπτες είτε ενδοσκοπία. Ο φωτισμός τέτοιων αντικειμένων μπορεί επίσης να είναι προβληματικός και να απαιτεί φωτεινές πηγές σε απόσταση είτε οδηγούς φωτός από οπτικές ίνες, για να επιτευχθεί φωτισμός στην κατάλληλη διεύθυνση.

#### **1.4.5 Θερμοκρασία**

Η υψηλή θερμοκρασία του δοκιμίου προκαλεί τριών ειδών προβλήματα. Πρώτον, η απώλεια άνεσης κατά την εργασία κοντά σε υψηλές θερμοκρασίες συχνά περιορίζει το χρόνο ελέγχου είτε απαιτεί συστήματα ελέγχου εξ αποστάσεως. Η υψηλή θερμοκρασία αλλοιώνει τις εικόνες και μικραίνει τη διακριτική ικανότητα (resolution), περιορίζοντας έτσι την ανίχνευση των ασυνεχειών. Δεύτερον, οι θερμικές τάσεις προκαλούν διαστολή είτε συστολή των μετάλλων, η οποία, εκτός από μεταβολή των διαστάσεων, μεγαλώνει είτε μικραίνει τη δυνατότητα ελέγχου, ανάλογα



με τη διεύθυνση των θερμικών τάσεων και ανάλογα με το άνοιγμα είτε κλείσιμο των γραμμικών ασυνεχειών. Τρίτον, η αντίθεση συχνά αλλάζει με την αλλαγή της θερμοκρασίας και γνωρίζουμε ότι η αντίθεση είναι το πρωταρχικό χαρακτηριστικό που διευκολύνει την εύρεση των ασυνεχειών. Ένα άτομο Επιπέδου 3 (Level 3) θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του αυτούς τους παράγοντες, όταν εκπονει μία διαδικασία οπτικού ελέγχου.

#### **1.4.6 Υφή και Ποιότητα Επιφανείας**

Η υφή και η ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας καθορίζουν το ποσοστό ανάκλασης του φωτός. Τραχείες επιφάνειες (όπως η επιφάνεια ενός πορτοκαλιού) σκεδάζουν το φως και φαίνονται ματ σε σχέση με λείες επιφάνειες. Έτσι, η υφή και η ποιότητα της επιφάνειας αλλάζουν το λόγο αντίθεσης, πράγμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος του οπτικού ελέγχου. Επιφάνειες εξαιρετικά λείες δεν είναι πάντοτε επιθυμητές για τη χρησιμότητα ενός δοκιμίου, παρόλο που τότε φαίνονται και τα παραμικρά επιφανειακά «γδαρσίματα» (scratch).

Η πλέον κατάλληλη κατάσταση επιφάνειας είναι μία ομοιόμορφη υφή, χωρίς οξείδωση και γραμμικά ίχνη κατεργασίας (από τρόχισμα, σφυριά κ.λπ.). Ο έλεγχος είναι πιο αποτελεσματικός σε επιφάνειες ομοιόμορφης αντίθεσης, παρά σε επιφάνειες κυμαινόμενης αντίθεσης.

#### **1.4.7 Τύπος Υλικού**

Κάθε τύπος υλικού αλλά και κατεργασίας εμφανίζει διαφορετικές ασυνέχειες. Η γενική γνώση των ασυνεχειών και του σχηματισμού τους είναι απαραίτητη σε έναν ελεγκτή ΜΚΔ και τα περισσότερα σχήματα πιστοποίησης προσωπικού απαιτούν γνώσεις στην τεχνολογία υλικών και κατεργασιών.

Τα μέταλλα παρουσιάζουν κοινές ασυνέχειες ενώ τα μη μεταλλικά υλικά όχι. Η εξειδικευμένη γνώση των κρίσιμων δοκιμών μπορεί να είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο, αλλά πρώτιστα ο ελεγκτής πρέπει να έχει στη διάθεση του συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τους τύπους των ασυνεχειών που ερευνά. Μόλις ανιχνευθούν οι ασυνέχειες και γίνει η καταγραφή τους, ειδικοί μηχανικοί υλικών μπορούν να εκτιμήσουν τα αίτια που τις προξένησαν και να αποφασίσουν για την αποδοχή ή απόρριψη του δοκιμίου.

Δεν πρέπει να αναμένουμε από τον ελεγκτή υψηλή εξειδίκευση σε όλους τους τύπους υλικών, καθώς το πεδίο αυτό είναι τεράστιο.

## **1.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

### **1.5.1 Καθρέπτες (Mirrors)**

Οι καθρέπτες που χρησιμοποιούνται στον οπτικό έλεγχο μπορεί να έχουν διαφορετικό μέγεθος και σχήμα αλλά πρέπει να έχουν ομοιόμορφο δείκτη ανάκλασης και να είναι επίπεδοι. Ανομοιομορφία του δείκτη ανάκλασης μπορεί να συμβεί λόγω φθοράς που αλλοιώνει την επιφάνεια, γδαρσίματος της εξωτερικής επιφάνειας είτε διάβρωσης της επάργυρης επιφάνειας. Η επιπεδότητα καθορίζει την αλλοίωση της εικόνας και μπορεί να ελεγχθεί με έναν κάναβο, όπως και στην περίπτωση ενός μεγεθυντικού φακού.

### **1.5.2 Μεγεθυντικοί φακοί (Magnifiers)**

Οι μεγεθυντικοί φακοί που χρησιμοποιούνται κατά τον οπτικό έλεγχο είναι αμφίκυρτοι, επιπεδόκυρτοι είτε συνδυασμός φακών. Οι μονοί μεγεθυντικοί φακοί αποτελούνται από ένα αμφίκυρτο φακό που μπορεί να δώσει μεγέθυνση έως 5 ×.

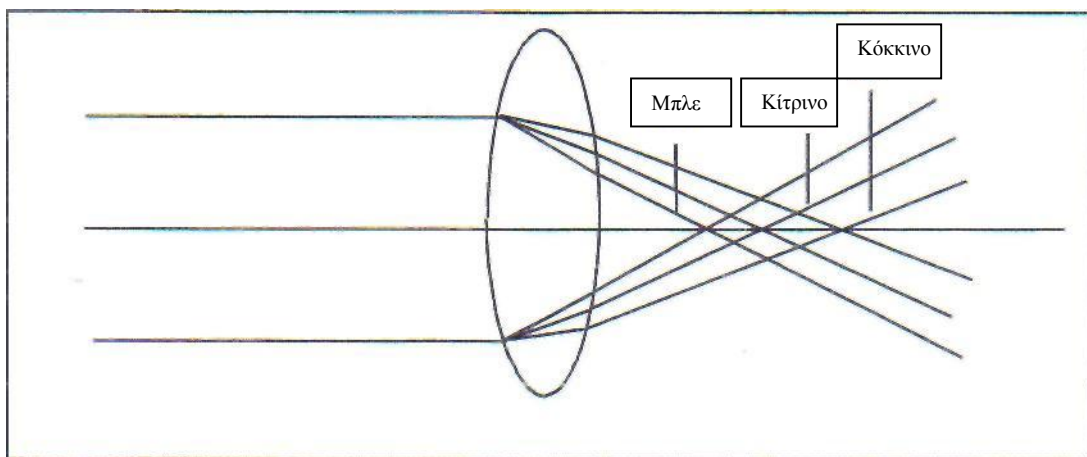
Δύο συνδυαζόμενοι φακοί μπορεί να δώσουν μεγαλύτερη μεγέθυνση από έναν, πρακτικά μειώνοντας την εστιακή απόσταση (focal length). Οι μονοί φακοί γενικά δεν δίνουν μεγαλύτερη μεγέθυνση από 20×, λόγω προβλημάτων εστίασης.

Μεγαλύτερη μεγέθυνση συνήθως απαιτεί μικροσκόπιο. Οι μεγεθυντικοί φακοί παρουσιάζουν τρία σύμφυτα σφάλματα, τα οποία μπορούν να διορθωθούν μέσω ειδικών τεχνικών και σχεδίασης. Τα σφάλματα είναι: Καμπύλωση της εικόνας (αστιγματισμός, distortion), σφαιρική εκτροπή (spherical aberration) και χρωματική εκτροπή (chromatic aberration).

Η καμπύλωση χαλά τις γεωμετρικές σχέσεις της εικόνας και εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού του φακού, τη γεωμετρική του ακρίβεια και την ποιότητα της λείανσης του. Γενικά, η εξωτερική περιφέρεια ενός μονού φακού παράγει τη μεγαλύτερη καμπύλωση. Φακοί που δεν παρουσιάζουν καμπύλωση-αστιγματισμό, καλούνται αναστιγματικοί.

Σφαιρική εκτροπή είναι ο όρος που χρησιμοποιείται όταν το φως που περνά από τα εξωτερικά άκρα του φακού, εστιάζεται σε διαφορετικές αποστάσεις. Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο, όσο αυξάνεται η διάμετρος του φακού. Το αποτέλεσμα της σφαιρικής εκτροπής είναι να έχουμε εστίαση μόνο ενός μέρους της εικόνας, κάθε στιγμή. Φακοί που δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο λέγονται απλανητικοί.

Χρωματική εκτροπή είναι ο όρος που χρησιμοποιείται όταν το φως που περνά από το φακό διαθλάται υπό διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με το μήκος κύματος των ακτινών που το αποτελούν (βλέπουμε σχ.1.2) . Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει σε ένα πρίσμα, όταν το λευκό φως διαχωρίζεται σε χρωματικές ζώνες (ουράνιο τόξο). Στην πράξη, η χρωματική εκτροπή παραμορφώνει το χρωματισμό μιας εικόνας, εστιάζοντας κάθε χρώμα σε διαφορετικό σημείο. Φακοί που δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο καλούνται αχρωματικοί. Η χρωματική εκτροπή διορθώνεται με χρήση συνδυασμού φακών διαφορετικών ποιοτήτων γυαλιού. Αυτή η αρχή εφαρμόζεται στους τριπλούς φακούς τύπου Hastings. Οι φακοί Hastings, εκτός από αχρωματικοί, είναι και απλανητικοί και είναι οι πλέον κατάλληλοι για χρήση χειρός.



**Εικόνα 1.2:** Χρωματική Εκτροπή

### 1.5.3 Εστιακή Απόσταση (Focal Length)

Είναι η απόσταση από το οπτικό κέντρο του φακού έως το σημείο όπου εστιάζονται ακτίνες φωτός παράλληλες στην ευθεία των εστιών του. Η εστιακή απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας φως ημέρας (διότι απαιτούνται παράλληλες ακτίνες φωτός) και μετακινώντας το φακό, έως ότου ένα μόνον σημείο εστιαστεί πάνω σε ένα στόχο (επίπεδο). Η μέτρηση της απόστασης ανάμεσα στο φακό και το επίπεδο, μας δίνει την εστιακή απόσταση.

Η εστιακή απόσταση δίνεται και από τον τύπο:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.6)$$

όπου  $R_1$  και  $R_2$  οι ακτίνες καμπυλότητας των δύο επιφανειών που συνθέτουν το φακό.

### 1.5.4 Άκαμπτα ενδοσκόπια

Τα άκαμπτα ενδοσκόπια (boroscopes/endoscopes) είναι άκαμπτα όργανα που αποτελούνται από πολλαπλούς αμφίκυρτους φακούς μέσα σε μία σωληνοειδή θήκη και έχουν δυνατότητα ρύθμισης της εστίασης μέσω του προσοφθάλμιου φακού (eye piece/ocular).

Τα περισσότερα όργανα περιλαμβάνουν ένα αυτόνομο μηχανισμό παροχής φωτός και αυτά τα όργανα διαιρούνται σε δύο κατηγορίες. Η μία κατηγορία βασίζεται στο φως που μεταδίδεται μέσω ενός εύκαμπτου καλωδίου-οδηγού του φωτός, που συνδέεται με το όργανο κοντά στο προσοφθάλμιο. Από εκεί το φως οδηγείται μέσω άκαμπτων οπτικών ινών έως το άκρο παρατήρησης (distal tip) είτε το άκρο του οργάνου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί πηγές φωτός υψηλής ποιότητας που παράγουν μεταβλητά επίπεδα φωτισμού με σταθερή θερμοκρασία χρώματος. Τέτοια όργανα ταξινομούνται ως «ψυχρού άκρου» (cold tip) και είναι απόλυτα ασφαλή για θέσεις όπου υπάρχει εκρηκτικό περιβάλλον.

### 1.5.5 Εύκαμπτα ενδοσκόπια

Τα εύκαμπτα ενδοσκόπια (ενδοσκόπια οπτικών ινών, fibrescopes) χρησιμοποιούν δέσμες ινών υάλου (δέσμες φωτοαγωγών). Οι ίνες έχουν πολύ μικρή διάμετρο, συχνά το 1/10 του πάχους μιας τρίχας. Κάθε ίνα είναι συνεχής και έχει

επενδυθεί με ύαλο διαφορετικού δείκτη διάθλασης, για να επιτυγχάνεται ολική ανάκλαση (δηλαδή μηδενική διάθλαση/διάβαση) στο εσωτερικό της ίνας.

Το φως μεταφέρεται μέσω συνεχών ολικών ανακλάσεων, από το προσοφθάλμιο στο άκρο παρατήρησης, διατηρώντας τη διακριτική ικανότητα (resolution).

Η μετάδοση φωτός για να υπάρχει φωτισμός και η μετάδοση της εικόνας χρησιμοποιούν διαφορετικές δέσμες ινών αλλά η ευκαμψία διατηρείται. Το άκρο παρατήρησης ενός εύκαμπτου ενδοσκοπίου μπορεί να καθοδηγηθεί, χρησιμοποιώντας χειριστήρια που βρίσκονται κοντά στο προσοφθάλμιο, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της διεύθυνσης όρασης από απόσταση.

Όλα τα εύκαμπτα ενδοσκόπια είναι ψυχρού άκρου και χρησιμοποιούν εξωτερικές πηγές φωτός. Τα μήκη τους ποικίλουν από 0,4 m έως 6m και οι διάμετροι από 2mm (ιατρικές χρήσεις) έως 12mm.

Το πεδίο της όρασης και η μεγέθυνση, κατά τη χρήση άκαμπτων είτε εύκαμπτων ενδοσκοπίων, σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους. Όταν χρησιμοποιείται μεγάλη μεγέθυνση, το πεδίο είναι περιορισμένο και αντίστροφα, ένα μεγάλο πεδίο όρασης απαιτεί μικρή μεγέθυνση.

Η ολική γωνία παρατήρησης για τα άκαμπτα ενδοσκόπια είναι γενικά μεταξύ 45° και 60°. Η κατεύθυνση παρατήρησης μπορεί να είναι ευθεία, ορθής γωνίας, πλαγιο-εμπρόσθια, οπίσθια ή πανοραμική. Τα πανοραμικά ενδοσκόπια έχουν ένα πρίσμα ρυθμιζόμενης κατεύθυνσης μέσα στο άκρο παρατήρησης, ενώ σε όλα τα άλλα το πρίσμα δεν ρυθμίζεται.

### **1.5.6 Video Ενδοσκόπια**

Παρότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές κάμερες σε συνδυασμό με άκαμπτα είτε εύκαμπτα ενδοσκόπια, για να καταγράψουν εικόνες είτε φωτογραφικά είτε μέσω τηλεόρασης κλειστού κυκλώματος, τα μήκη των οργάνων αυτών είναι περιορισμένα, λόγω των απωλειών φωτός, σε 10 το πολύ μέτρα. Αντίθετα, με χρήση τεχνολογίας στερεάς κατάστασης (solid state) και τοποθετώντας μια μικροσκοπική κάμερα στο άκρο παρατήρησης ενός ενδοσκοπίου, μπορούμε να έχουμε εικόνες video από αποστάσεις μεγαλύτερες των 30 μέτρων. Αυτές οι κάμερες στερεάς κατάστασης είναι γνωστές σαν C.C.D. (charge-coupled discharge devices) και

μπορούν να είναι μικρές έως 6 mm σε διάμετρο. Το άκρο παρατήρησης είναι καθοδηγούμενο, όπως σε πολλά εύκαμπτα ενδοσκόπια, για να ρυθμίζεται εξ αποστάσεως η διεύθυνση παρατήρησης και να βοηθάται η διείσδυση σε πολύπλοκα συστήματα σωληνώσεων.

Το φως μεταφέρεται μέσω οπτικών ινών από μία πηγή, όπως ακριβώς στα απλά εύκαμπτα ενδοσκόπια. Η εικόνα όμως εστιάζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα CCD και εκεί μετατρέπεται σε ηλεκτρικούς παλμούς, οι οποίοι μεταφέρουν τις πληροφορίες σε έναν επεξεργαστή (processor). Ο επεξεργαστής ενισχύει και φιλτράρει τα ηλεκτρικά σήματα, ώστε να παραχθεί μια εικόνα video σε μια οθόνη υψηλής διακριτικής ικανότητας. Μπορούν να επιτευχθούν έγχρωμες εικόνες, χρησιμοποιώντας περιστρεφόμενο φωτισμό των τριών βασικών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο και μπλε). Αλλαγές στην αντίθεση λόγω των χρωμάτων διορθώνονται ψηφιακά από τον επεξεργαστή, δίνοντας μια πλήρη έγχρωμη εικόνα.

Οι εικόνες σε μορφή video μπορούν να αποθηκευτούν σε ταινίες video. Εντούτοις, η διακριτική ικανότητα συχνά ελαττώνεται, λόγω κακής ποιότητας video-κασέτας. Μια εικόνα από κάμερα υψηλής διακριτικής ικανότητας που παρέχει 525 γραμμές κατά μήκος της οθόνης, θα αποδοθεί μόνο με 200 γραμμές, εάν αποθηκευτεί με ένα συνηθισμένο καταγραφικό video. Έτσι, η χρήση εξοπλισμού υψηλής διακριτικής ικανότητας για την καταγραφή των εικόνων είναι ουσιαστική, προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα της εικόνας.

### **1.5.7 Τηλεόραση κλειστού κυκλώματος**

Η τηλεόραση κλειστού κυκλώματος (closed circuit television-CCTV) μπορεί να μας δώσει εικόνες από περιοχές υψηλού κινδύνου είτε σε απομακρυσμένες θέσεις. Οι κάμερες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (chip cameras) έχουν εξελιχθεί ώστε να καταλαμβάνουν μικρό όγκο. Συχνά, τηλεκατευθυνόμενα οχήματα (remotely operated vehicle, ROV) χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τις κάμερες μέσα σε συστήματα σωληνώσεων είτε ακόμη και κάτω από το νερό, για να προσεγγιστεί το σημείο ελέγχου.

Υπάρχουν τρεις τύποι κάμερας στερεής κατάστασης (solid state είτε κάμερα ολοκληρωμένου κυκλώματος – chip camera): Ο πρώτος είναι οι κάμερες με CCD που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί CID (charge injection

device) και ο τρίτος ημιαγωγός οξειδίων μετάλλου (metal oxide semi conductor, MOS). Οι κάμερες τύπου MOS προτιμώνται για την τοποθέτηση πάνω σε ROV, λόγω της μικρής κατανάλωσης ενέργειας που έχουν.

Μια άλλη κατηγορία κάμερας, είναι αυτή που χρησιμοποιεί σωλήνες (tubes). Υπάρχουν δύο τύποι κάμερας σωλήνων : orthonicon και vidicon.

Οι κάμερες της τηλεόρασης που χρησιμοποιούνται για εκπομπή εικόνας λέγονται orthonicon και χρησιμοποιούν σωλήνες φωτο-εκπομπής. Παρέχουν την καλύτερη ποιότητα εικόνας και μπορούν να εργαστούν και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Οι κάμερες τύπου vidicon είναι μικρότερων διαστάσεων και λιγότερο ακριβές από εκείνες του τύπου orthonicon. Απαιτούν όμως υψηλό επίπεδο φωτισμού. Εντούτοις ο τύπος vidicon είναι ο πλέον κατάλληλος για χρήση σε περιοχές με υψηλή ραδιενέργεια.

### **1.5.8 Αυτοματοποιημένα Συστήματα**

Τα οπτικά συστήματα μπορούν να προσαρμοστούν σε πολλών ειδών αυτοματοποιημένα συστήματα παρατήρησης. Ακτίνες laser χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με συστήματα καθρεπτών, για την παρατήρηση κινούμενων αντικειμένων. Οπτικά συστήματα ελεγχόμενα από ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιούνται στη γραμμή παραγωγής για την ταξινόμηση αντικειμένων και για την ανεύρεση ατελειών. Το βάψιμο μιας επιφάνειας μπορεί να ελεγχθεί με αυτόματα συστήματα για διάφορες ατέλειες της επίστρωσης με βογιά ενώ υπάρχει και η δυνατότητα, μέσω υπολογιστή και ρομποτικού συστήματος ψεκασμού, για αυτόματη διόρθωση ατελειών.

### **1.5.9 Συστήματα Ενισχυμένα με Υπολογιστή**

Η ψηφιακή επεξεργασία της video-εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της. Χρησιμοποιούνται φίλτρα για να αποκλείσουν τα μη επιθυμητά σήματα, όπως:

- Υψιπερατά/Ανωδιαβατά φίλτρα (high pass filter) τα οποία ενισχύουν τις απότομες μεταβολές και αποδυναμώνουν τις ομαλές μεταβολές.

- Ζωνοδιαβατά/Ζωνοπερατά (zone pass filter), τα οποία ελαττώνουν το θόρυβο του υποβάθρου, χωρίς να εξομαλύνουν τις αιχμές (απότομες μεταβολές)
- Χαμηλοπερατά/Κατωδιαβατά φίλτρα (low pass filter), τα οποία εξομαλύνουν τις αιχμές.

Η ολογραφία είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο ακτίνων laser, ώστε να παράγεται μία φανταστική (virtual) εικόνα τριών διαστάσεων. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την περιστροφή της εικόνας του αντικειμένου, ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση του υπό διάφορες γωνίες, χωρίς στην πραγματικότητα να περιστρέφεται το αντικείμενο.

### **1.5.10 Φωτογραφία**

Οι φωτογραφικές καταγραφές (photographic records) παρέχουν τη μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα από κάθε άλλη τεχνική καταγραφής. Εντούτοις, αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω φακών υψηλής ποιότητας και φιλμ μικρού κοκκώδους (fine grain film ). Οι φωτογραφικές μηχανές τοποθετούνται στο άκαμπτο ή εύκαμπτο ενδοσκόπιο και συλλαμβάνουν την εικόνα σε συγκεκριμένες αποστάσεις.

Το επίπεδο φωτισμού καθορίζει το χρόνο έκθεσης και την επιλογή του φιλμ. Όσο χαμηλότερος είναι ο φωτισμός, τόσο μεγαλύτερη η διάρκεια της έκθεσης. Πολύ χαμηλός φωτισμός απαιτεί γρήγορα φιλμ, π.χ. 400 είτε 1000 ASA. Αυτά όμως έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου κοκκώδους και επομένως της χαμηλής ποιότητας της εικόνας. Τεχνικές φωτισμού που να ενισχύουν την εικόνα, περιορίζοντας τις ανακλάσεις προς τη μηχανή, είναι πολύ χρήσιμες, καθώς επίσης και η χρήση πολλαπλών πηγών φωτός.

Η βέλτιστη ποιότητα εικόνας συχνά επιτυγχάνεται με φυσικό φωτισμό, όταν υπάρχει σε επάρκεια. Επιτυχείς μεγεθύνσεις γίνονται με μεγάλα αρνητικά, αλλά αυτό απαιτεί φωτογραφική μηχανή ειδικού τύπου.

Οι ασπρόμαυρες φωτογραφίες παρέχουν μεγαλύτερη αντίθεση (contrast), σε σχέση με τις έγχρωμες.

### **1.5.11 Ελεγκτήρες, Καλίμπρες και Μετρητικές Συσκευές**

Παρότι μπορούμε να χρησιμοποιούμε πολύπλοκα συστήματα παρατήρησης, είναι επίσης σημαντικό να αποκτήσουμε γνώση των διαστασιακών αναλογιών της εικόνας, χρησιμοποιώντας κάποιου είδους κλίμακα. Μετρητικό νήμα (reticule) είτε



μετρητικός σταυρός (graticule) συχνά τοποθετούνται πάνω στην οθόνη, για συγκριτική παρατήρηση, παρότι απαιτείται εξαιρετική προσοχή, όταν εφαρμόζονται μεγάλες μεγεθύνσεις. Βαθμιδωτές μετρητικές ταινίες είτε αυτοκόλλητες ταινίες συχνά χρησιμοποιούνται για ακριβείς μετρήσεις, ιδιαίτερα κατά τη φωτογράφιση, για να δώσουν την κλίμακα μεγεθών στην καταγραφή. Αυτές τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων, ώστε να αποφεύγεται κάθε λάθος λόγω οπτικής αντίληψης.

Η χειροκίνητη μέτρηση είναι μια εργασία οπτικού ελέγχου που διεξάγεται με τη χρήση διαφόρων οργάνων. Η μέτρηση μήκους συχνά απαιτεί τη χρήση κανόνα (ρίγας), μετρητικής ταινίας, παχύμετρου ή μικρόμετρου. Όμως, πολύπλοκα σχήματα συχνά απαιτούν τη χρήση ελεγκτήρων (gauge) πολλαπλών ελέγχων.

Περιοχές περιορισμένης πρόσβασης ή κατατομές που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση, μπορεί να απαιτούν την εφαρμογή μεθόδων αντιγραφής (replication). Υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αντίγραφου (replica) είναι πλαστικό σιλικόνης (silicon rubber), διαφανής αχυροκυτταρίνη (cellulose acetate) ή μίξεις εποξικών υλικών (bonded epoxy), ακόμη και πηλός αγγειοπλαστικής.

Οι συγκολλήσεις καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος των οπτικών ελέγχων και γι' αυτό έχουν επινοηθεί πολλών ειδών ελεγκτήρες όπως για τη μέτρηση Υψηλού-Χαμηλού (Hi-Low), της γωνιακής ανοχής και του βάθους. Οι επαναλαμβανόμενοι έλεγχοι συχνά χρησιμοποιούν ειδικές καλίμπρες. Αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της κατατομής μιας εξοχής είτε μιας εσοχής και μπορεί να είναι διαφανείς είτε αδιαφανείς. Συγκριτές εικόνας είτε προβολείς εικόνας χρησιμοποιούν επιτιθέμενες καλίμπρες για σύγκριση κατατομής ταυτόχρονα με μεγέθυνση της εικόνας, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Όταν χρησιμοποιούμε καλίμπρα, ελεγκτήρα ή άλλο όργανο, η πληροφορία που αντλούμε δεν μπορεί να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από την ακρίβεια του οργάνου. Έτσι, όλα τα όργανα θα πρέπει να ελέγχονται περιοδικά.

## 2. ΥΠΕΡΗΧΟΙ

### 2.1 ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

#### 2.1.1 Ελαστικό Κύμα και Ιδιότητες

Όλοι μας έχουμε φυσικές εντυπώσεις ελαστικών κυμάτων και διάδοσης τους (π.χ. θαλάσσια κύματα, σημαίες που κυματίζουν, χορδές που πάλλονται κ.λπ.).

Για τη δημιουργία ελαστικού κύματος, πρέπει να προϋπάρξει μία ελαστική διαταραχή σε κάποιο σημείο ενός μέσου (π.χ. ρίψη ενός βότσαλου στη θάλασσα ή το χτύπημα του διαπασών είτε μιας χορδής). Τα μόρια του μέσου αρχίζουν να ταλαντώνονται αλλά ταυτόχρονα να μεταδίδουν την ταλάντωση αυτή σε γειτονικά τους μόρια, με συγκεκριμένη μάλιστα ταχύτητα.

Κύμα (ελαστικότητας) λοιπόν λέγεται η διάδοση μιας (ελαστικής) διαταραχής, μέσα σε ένα ελαστικό μέσο, με ορισμένη ταχύτητα.

Είναι επομένως η ενέργεια εκείνη που διαδίδεται και μεταφέρεται (μέσω των ταλαντώσεων των μορίων) και όχι η ύλη.

Κάθε κύμα ελαστικότητας έχει τρία χαρακτηριστικά:

α) Την ταχύτητα διάδοσης του ( $c$ )

β) Τη συχνότητα του κύματος, δηλαδή το πόσες φορές στη μονάδα του χρόνου ένα ταλαντούμενο μόριο περνά από το αρχικό σημείο (ή το ίδιο σημείο) ( $f$ )

Η περίοδος ( $T$ ) είναι το αντίστροφο της συχνότητας, δηλ. ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης ενός μορίου ( $T=1/f$ )

γ) Το μήκος κύματος, δηλαδή την απόσταση που διανύει ένα κύμα, στο διάστημα που ένα μόριο εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση ( $\lambda$ )

Άρα προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι το γινόμενο της απόστασης που διανύει το κύμα σε κάθε ταλάντωση ενός μορίου επί τον αριθμό των ταλαντώσεων που συντελούνται στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ταχύτητα διάδοσης = μήκος κύματος  $\times$  συχνότητα ( $c=\lambda \times f$ ).

Πάντως, σε ένα ομογενές σώμα στο οποίο μεταδίδεται ελαστικό κύμα, όλα τα μόρια έχουν την ίδια συχνότητα ταλάντωσης και παρουσιάζουν την ίδια ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (δηλ. η συχνότητα, το μήκος κύματος και η ταχύτητα μετάδοσης του είναι σταθερά για το συγκεκριμένο σώμα και κύμα).

## 2.1.2 Ήχος και Υπέρηχος

Τα ηχητικά κύματα (ήχος) δεν είναι τίποτε άλλο παρά κύματα ελαστικότητας που μεταδίδονται στον αέρα κυρίως και έχουν κατάλληλη συχνότητα και ένταση ώστε να μας προκαλούν το αίσθημα της ακοής.

Ο ήχος, σαν ελαστικό κύμα που είναι, μεταδίδεται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα, αλλά όχι στο κενό (σε αντίθεση με το φως).

Ο ήχος μεταδίδεται υπό μορφή ζωνών συμπίεσης (compression zone) και υποπίεσης (rarefied zone) των μορίων του σώματος που τον μεταφέρει.

Για να ακούγεται ένας ήχος από το ανθρώπινο αυτί, πρέπει να έχει συχνότητα 16 Hz έως 20.000 Hz (20 KHz) και βέβαια κατάλληλη ένταση. Για το δελφίνι, τα όρια γίνονται 150 Hz έως 150 KHz και για τη νυχτερίδα 1 KHz έως 120KHz.

Ήχοι με συχνότητα μικρότερη των 16 Hz λέγονται "υπόηχοι" και με συχνότητα μεγαλύτερη των 20 KHz "υπέρηχοι".

Οι υπέρηχοι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε πλήθος επιστημών (όπως π.χ. η Ιατρική) αλλά χρησιμοποιούνται επίσης σαν μέθοδος Μη Καταστρεπτικής Δοκιμής (Non-Destructive Testing) , για την εύρεση ασυνεχειών μεταλλικών και άλλων προϊόντων, τη μέτρηση του πάχους υλικών και άλλες εφαρμογές.

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται σε ΜΚΔ σε συχνότητες από 100.000 Hz (100kHz) έως 25.000.000 Hz (25 MHz).

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες όμως συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 1 και 6 MHz.

## 2.1.3 Τύποι κυμάτων (wave modes)

1. Διαμήκη κύματα ή κύματα συμπίεσης (longitudinal/compression waves)  
Η διεύθυνση της ταλάντωσης είναι η ίδια με τη διεύθυνση της μετάδοσης του κύματος.

Μεταδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο :

$$C_L \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ η πυκνότητά του. Έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από όλους τους τύπους κυμάτων. Άρα, για δεδομένη συχνότητα και

υλικά διάδοσης προκύπτει από τον τύπο  $c=\lambda \times f$  ότι έχουν το μεγαλύτερο μήκος κύματος, και επομένως (όπως θα δούμε παρακάτω) τη μικρότερη αποδυνάμωση του ήχου αλλά και τη μικρότερη (χειρότερη) ευαισθησία. Παρουσιάζουν επίσης την μικρότερη εγγύς ζώνη N και τη μεγαλύτερη γωνία απόκλισης δέσμης (για δεδομένη διάμετρο κρυστάλλου, υλικό και συχνότητα διάδοσης).

## 2. Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα (transverse/shear waves)

Η διεύθυνση της ταλάντωσης είναι κάθετη προς τη διεύθυνση της μετάδοσης του κύματος.

Μεταδίδονται μόνο σε στερεά σώματα, διότι τα υγρά και αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε εγκάρσια φόρτιση.

Έχουν ταχύτητα διάδοσης περίπου τη μισή των διαμηκών (στο ίδιο υλικό) και επομένως, για την ίδια συχνότητα, έχουν τη διπλάσια περίπου ευαισθησία και πολύ μεγαλύτερη αποδυνάμωση. Για την ίδια διάμετρο κρυστάλλου, έχουν μεγαλύτερη εγγύς ζώνη N και μικρότερη γωνία απόκλισης δέσμης.

Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Όπου G το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $\rho$  η πυκνότητά του.

## 3. Επιφανειακά κύματα (surface) ή κύματα Rayleigh

Πρόκειται για κύματα που μεταδίδονται μόνο στην επιφάνεια των στερεών, σε βάθος ενός περίπου μήκους κύματος.

Τα επιφανειακά κύματα μπορούν να αποσβεστούν (dampen) θέτοντας νερό, ορυκτέλαιο ή απλώς ένα δάκτυλο πάνω στην επιφάνεια που μεταδίδονται. Παραγωγή επιφανειακών κυμάτων γίνεται με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης ( $2^{\text{η}}$  κρίσιμη γωνία), ώστε το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  με τον κάθετο στη διεπιφάνεια άξονα.

Τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν στην επιφάνεια ακόμη και αν αυτή παρουσιάζει ελαφρά καμπυλότητα και ανακλώνται όπου συναντούν ακμές ή γωνίες.

Τα δονούμενα σωματίδια που μεταδίδουν επιφανειακά κύματα κινούνται σε ελλειπτική τροχιά.

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου ίση με το ενενήντα τοις εκατό (0.9) της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στο ίδιο υλικό.

#### 4. Κύματα ελασμάτων (Plate) ή κύματα Lamb

Όταν υπερηχητικές δονήσεις μεταδίδονται σε σχετικά λεπτά ελάσματα (πάχους μερικών μόνο μηκών κύματος), η μετάδοση ενέργειας παίρνει τη μορφή κυμάτων "ελασμάτων".

Η τροχιά των μορίων ομοιάζει κάπως με την ελλειπτική τροχιά των επιφανειακών κυμάτων αλλά είναι αρκετά πιο πολύπλοκη.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι κυμάτων (συμμετρικά - symmetrical και ασύμμετρα - asymmetric) και πολλοί δευτερεύοντες (1<sup>ος</sup>, 2<sup>ος</sup>, 3<sup>ος</sup> κλπ.).

Χαρακτηριστικό των κυμάτων Lamb είναι ότι όλο το λεπτό έλασμα δονείται σαν ένα σώμα.

Η ταχύτητα τους εξαρτάται ΚΑΙ από τη συχνότητα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Κύματα των οποίων η ταχύτητα εξαρτάται και από τη συχνότητα ονομάζονται "dispersive".

### 2.1.4 Συχνότητα - Μήκος κύματος - Ταχύτητα διάδοσης κύματος

Στο Διεθνές Σύστημα (S.I.) η συχνότητα  $f$  ενός κύματος (άρα και του ήχου/ υπέρηχου) μετράται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (cps) ή Hertz(Hz).

1 Hz =1 κύκλος/δευτερόλεπτο (1 Χέρτζ)

1 KHz =1000 κύκλοι/δευτερόλεπτο =  $10^3$  Hz (1 Κιλοχέρτζ)

1 MHz = 1.000.000 κύκλοι/δευτερόλεπτο =  $10^3$  KHz=  $10^6$  Hz (1 Μεγαχέρτζ)

Το μήκος κύματος  $\lambda$  μετράται σε μέτρα (m) και επειδή είναι πολύ μικρό, συνήθως σε χιλιοστά του μέτρου (mm) ταχύτητα μετάδοσης  $c$  μετράται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec).

Η σχέση μεταξύ συχνότητας, μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσης είναι  $c=\lambda \times f$ .

Η κύρια συχνότητα του υπέρηχου εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη κεφαλή (και αναγράφεται πάνω σε αυτήν), η ταχύτητα μετάδοσης εξαρτάται από το υλικό και επομένως το μήκος κύματος προκύπτει από τα ανωτέρω, για κάθε χρησιμοποιούμενη κεφαλή και μέσο διάδοσης του υπέρηχου.

Το μήκος κύματος μας ενδιαφέρει, διότι το μικρότερο ανιχνεύσιμο σφάλμα θεωρείται πρακτικά ίσο με το ήμισυ του μήκους κύματος.

### 2.1.5 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης

Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από την πυκνότητα  $\rho$  του μέσου διάδοσης (σε  $\text{kg/m}^3$ ) και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού (σε  $\text{N/m}^2$ ), σύμφωνα με τη σχέση.

$$C_L \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

Για τον χάλυβα ( $E=210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho=7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) προκύπτει ταχύτητα διάδοσης πρακτικά ίση με  $6000 \text{ m/sec}$ , για τα διαμήκη κύματα, ενώ για το αλουμίνιο περίπου  $6.400 \text{ m/sec}$ .

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο ανωτέρω τύπος είναι προσεγγιστικός και όχι ακριβής, διότι δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος του Poisson  $\mu$ .

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων, ο τύπος γίνεται

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

όπου  $G$  το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση.

Ο χάλυβας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων ( $3,230 \text{ m/sec}$ ), ενώ στο αλουμίνιο η αντίστοιχη ταχύτητα είναι  $3.130 \text{ m/sec}$ .

Πρακτικά, η ταχύτητα του εγκάρσιου (transverse/shear) κύματος θεωρείται περίπου η μισή του διαμήκους στο αυτό μέσο.

Επειδή τα υγρά και τα αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε διάτμηση, μεταδίδουν μόνο διαμήκη κύματα (κύματα πίεσεως) longitudinal waves /compression waves).

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων (surface/Rayleigh) πρακτικά θεωρείται ίση με το 90% της ταχύτητας των εγκάρσιων.

Η ταχύτητα κυμάτων Lamb (ή plate waves) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (υλικό διάδοσης, συχνότητα, γωνία πρόσπτωσης, πάχος ελάσματος).

Το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  επί την ταχύτητα διάδοσης ο καλείται ακουστική αντίσταση (acoustic impedance), μετράται σε  $\text{kg/m}^2/\text{sec}$  και συμβολίζεται με  $z (= \rho \times c)$ .

### 2.1.5 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης

Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από την πυκνότητα  $\rho$  του μέσου διάδοσης (σε  $\text{kg/m}^3$ ) και το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του υλικού (σε  $\text{N/m}^2$ ), σύμφωνα με τη σχέση.

$$C_L \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.3)$$

Για τον χάλυβα ( $E=210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho=7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) προκύπτει ταχύτητα διάδοσης πρακτικά ίση με  $6000 \text{ m/sec}$ , για τα διαμήκη κύματα, ενώ για το αλουμίνιο περίπου  $6.400 \text{ m/sec}$ .

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο ανωτέρω τύπος είναι προσεγγιστικός και όχι ακριβής, διότι δεν έχει ληφθεί υπόψη ο λόγος του Poisson  $\mu$ .

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων, ο τύπος γίνεται

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

όπου  $G$  το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση.

Ο χάλυβας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων ( $3,230 \text{ m/sec}$ ), ενώ στο αλουμίνιο η αντίστοιχη ταχύτητα είναι  $3.130 \text{ m/sec}$ .

Πρακτικά, η ταχύτητα του εγκάρσιου (transverse/shear) κύματος θεωρείται περίπου η μισή του διαμήκους στο αυτό μέσο.

Επειδή τα υγρά και τα αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε διάτμηση, μεταδίδουν μόνο διαμήκη κύματα (κύματα πίεσεως) longitudinal waves /compression waves).

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων (surface/Rayleigh) πρακτικά θεωρείται ίση με το 90% της ταχύτητας των εγκάρσιων.

Η ταχύτητα κυμάτων Lamb (ή plate waves) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (υλικό διάδοσης, συχνότητα, γωνία πρόσπτωσης, πάχος ελάσματος).

Το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  επί την ταχύτητα διάδοσης ο καλείται ακουστική αντίσταση (acoustic impedance), μετράται σε  $\text{kg/m}^2/\text{sec}$  και συμβολίζεται με  $z (= \rho \times c)$ .

## 2.1.6 Πυκνότητα, Ταχύτητα διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, Ακουστική αντίσταση διαφόρων υλικών

Πίνακας 2.1

Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ταχύτητα $C_L$ (m/sec)	Ταχύτητα $C_T$ (m/sec)	Ακουστική Αντίσταση $Z$ (Kg/m <sup>2</sup> /sec)
Αλουμίνιο (2SO)	2710	6350	3130	$17,2 \times 10^6$
Χαλκός	8900	4660	2260	$41,8 \times 10^6$
Μόλυβδος	11400	2160	700	$24,6 \times 10^6$
Χάλυβας	7850	5920	3230	$45,6 \times 10^6$
Quartz (χαλαζίας)	2650	5760	2200	$15,3 \times 10^6$
Perspex-Plexiglas	1180	2730	1430	$3,2 \times 10^6$
Νερό (20° C)	1000	1480	-	$1,5 \times 10^6$
Αέρας	1,3	330	-	330
Λάδι λιπάνσεως	870	1740	-	$1,5 \times 10^6$

## 2.1.7 Ένταση του ήχου

Ο ήχος (και ο υπέρηχος), εφόσον προσδιορίστηκε σαν κύμα που μεταφέρει ενέργεια πίεσεως, έχει σαν χαρακτηριστικό και την ένταση

Για τη σύγκριση της ηχητικής έντασης (ή ηχητικής πίεσης) δύο ήχων, χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα με βάση το 10 και σαν μονάδα το Bell. Στην πράξη, σαν μονάδα χρησιμοποιείται το ένα δέκατο (0,1) του Bell, δηλαδή το 1 dB (ντεσιμπέλ).

Η σχέση σε dB μεταξύ δύο ήχων πίεσης  $P_1$  και  $P_2$  δίνεται από τον τύπο:

$$I = 10 \log(P_2^2 / P_1^2) \quad (2.5)$$

$$\text{ή απλούστερα } I = 20 \log(P_2 / P_1) \quad (2.6)$$

Ο λόγος  $P_2/P_1$  καλείται και συντελεστής αύξησης (gain factor).

Επειδή στην οθόνη της συσκευής υπερήχων η πίεση (πλάτος του κύματος) μεταφράζεται σε ύψος του σήματος, προκύπτει ότι διπλασιασμός του ύψους σήματος σημαίνει αύξηση (gain) 6 dB και δεκαπλασιασμός του αύξηση 20 dB.

Λόγω των μαθηματικών ιδιοτήτων των λογαρίθμων, ισχύει επίσης ότι υποδιπλασιασμός του σήματος σημαίνει -6dB και υποδεκαπλασιασμός -20dB.



### 2.1.8 Σχέσεις που καθορίζουν την Αύξηση (Gain)

$$\Delta dB = 20 \log \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad V: \text{Ύψος σήματος στην οθόνη} \quad (2.7)$$

$$\Delta dB = 20 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad P: \text{Πίεση ήχου (πλάτος κύματος)} \quad (2.8)$$

$$\Delta dB = 10 \log \left( \frac{E_2}{E_1} \right) \quad E: \text{Ένταση ήχου} \quad (2.9)$$

$$\Delta dB = 20 \log \left( \frac{a_1}{a_2} \right) \quad a: \text{Απόσταση ανακλαστήρα-πηγής ήχου (σφαιρικό κύμα)} \quad (2.10)$$

$$\Delta dB = 10 \log \left( \frac{a_1}{a_2} \right) \quad a: \text{Απόσταση ανακλαστήρα-πηγής ήχου (κυλινδρικό κύμα)} \quad (2.11)$$

$$\Delta dB = 10 \log \left( \frac{A_2}{A_1} \right) \quad A: \text{Επιφάνεια ανακλαστήρα} \quad (2.12)$$

$$\Delta dB = 20 \log \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \quad D: \text{Διάμετρος ανακλαστήρα} \quad (2.13)$$

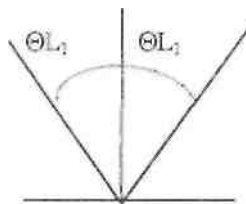
## 2.2 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΉΧΟΥ

### 2.2.1 Ανάκλαση και διάθλαση του ηχητικού κύματος. Νόμος του Snell

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μία επιφάνεια διαφορετικής ακουστικής αντίστασης (acoustic impedance), τότε συμβαίνουν ταυτόχρονα ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction) και μετατροπή τύπου (mode conversion).

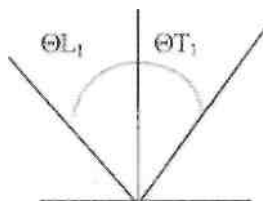
Οι σχετικές γωνίες πρόσπτωσης (incidence), ανάκλασης και διάθλασης συσχετίζονται σύμφωνα με το νόμο του Snell (Snell's law), που αναλύεται όπως κατωτέρω: Δείκτης L για διαμήκη κύματα, T για εγκάρσια κύματα, δείκτες 1 και 2 για τα μέσα διάδοσης 1 και 2.

C: Η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (στο μέσο 1 ή 2 με δείκτη L για διαμήκες και T για εγκάρσιο κύμα).



Σχήμα 2.1: Ανάκλαση διαμήκους σε διάμηκες κύμα.

Η γωνία ανάκλασης είναι πάντα ίση με τη γωνία πρόσπτωσης.



**Σχήμα 2.2:** Ανάκλαση διαμήκους σε εγκάρσιο κύμα.

$$\frac{hm\omega L_1}{CL_1} = \frac{hm\omega T_1}{CT_1} \quad (2.14)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας ότι  $CL_1 \approx 2CT_1$ , προκύπτει ότι  $\eta\mu\theta_{L_1} \approx 2\eta\mu\theta_{T_1}$  και άρα  $\theta_{T_1} < \theta_{L_1}$ .

### 2.2.2 Εφαρμογές του Νόμου Snell

Με αξιοποίηση του Νόμου του Snell παράγονται και διαδίδονται μόνο εγκάρσια κύματα σε ένα υλικό, με συγκεκριμένη γωνία διάθλασης, παρότι από τον κρύσταλλο εκπέμπονται μόνο διαμήκη κύματα.

Τα εγκάρσια κύματα παράγονται στο χάλυβα σε γωνίες μεταξύ  $38^\circ$  και  $80^\circ$  και συνήθως σε τυποποιημένες τιμές  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $70^\circ$ .

Ο νόμος του Snell έχει εφαρμογή όχι μόνο στην περίπτωση ηχητικών κυμάτων αλλά και γενικότερα (π.χ. σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα).

### 2.2.3 Ακουστική αντίσταση (Acoustic Impedance)

Ακουστική αντίσταση  $Z$  (Acoustic Impedance) καλείται το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  και της ταχύτητας διάδοσης του κύματος  $c$ .

$$Z = \rho \times c \quad (2.15)$$

Σε μία διεπιφάνεια (δηλ. μεταξύ μέσων διαφορετικής ακουστικής αντίστασης), ένα μέρος της συνολικής ενέργειας ( $R_o$ ) ανακλάται και επιστρέφει στο μέσον 1 ( $R$ ) και ένα μέρος συνεχίζει τη μετάδοση του στο μέσον 2 ( $R_t$ ).

$$\text{Ισχύει η σχέση } \frac{R}{R_o} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2.16)$$

Ο λόγος  $R/R_o$  καλείται και δείκτης ανάκλασης (Reflection factor). Το ποσοστό λοιπόν της μεταδιδόμενης ενέργειας είναι:

$$\frac{R_t}{R_o} = 1 - \frac{R}{R_o} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.17)$$

Ο λόγος  $R_t/R_o$  καλείται και δείκτης μετάδοσης.

## 2.3 ΚΕΦΑΛΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### 2.3.1 Παραγωγή Υπερήχων

Υπέρηχοι παράγονται:

1. Με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (Curie, 1880)
2. Με το φαινόμενο μαγνητο-συστολής (Magnetic-strictive, Joule 1847)

Στη μέθοδο υπερήχων χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο: Όταν εφαρμόζεται (εναλλασσόμενη) ηλεκτρική τάση σε ένα στοιχείο (κρύσταλλο) τότε αυτό διαστέλλεται και συστέλλεται, παράγοντας δόνηση υψηλής συχνότητας (άρα λειτουργεί ως πομπός υπερήχων).

Όταν, αντίστροφα, το στοιχείο δέχεται κύματα πίεσης (υπέρηχο), παράγεται ηλεκτρική τάση (άρα το στοιχείο λειτουργεί σαν δέκτης).

Μία κεφαλή υπερήχων μπορεί να έχει ένα μόνο στοιχείο (πομπό + δέκτη) είτε δύο (δίδυμη κεφαλή).

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (συνήθως αποκαλούμενα "κρύσταλλοι") είναι σήμερα 3 ειδών κυρίως:

α. Κρύσταλλοι χαλαζία (quartz). Πρόκειται για κρυσταλλικό Οξειδίο του Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Το "κλασσικό" πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, με υψηλή χημική, ηλεκτρική και θερμική σταθερότητα, αδιάλυτο, σκληρό και υψηλής αντίστασης σε φθορά. Είναι όμως πομπός πολύ μικρής απόδοσης αλλά και δέκτης χωρίς ιδιαίτερα ικανοποιητικά χαρακτηριστικά.

Οι κρύσταλλοι χαλαζία μπορούν να κοπούν κάθετα προς τον άξονα -X, οπότε παράγουν διαμήκη κύματα, είτε κάθετα προς τον άξονα -Ψ, οπότε παράγουν εγκάρσια κύματα. Αυτό όμως δεν είναι τόσο σημαντικό, διότι τα εγκάρσια κύματα παράγονται με μετατροπή τύπου μέσω κατάλληλης γωνίας πρόσπτωσης διαμήκους κύματος (μεγαλύτερη από την  $1^\circ$  και μικρότερη από την  $2^\circ$  κρίσιμη).

Το πάχος του κρυστάλλου επιδρά άμεσα στο παραγόμενο μήκος κύματος ( $T = \lambda/2$ ) και γι' αυτό λεπτοί κρύσταλλοι μεγάλων συχνοτήτων (π.χ. 10-15MHz) χρησιμοποιούνται μόνο στη μέθοδο βύθισης, διότι στη μέθοδο επαφής είναι εύκολο να σπάσουν.

β. Πολωμένα κεραμικά (polarized ceramics). Πρόκειται για προϊόντα πυροσυσσωμάτωσης, που παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες πομπού (πολύ μεγάλη απόδοση). Είναι αδιάλυτα αλλά γηράσκουν γρήγορα και γίνονται ψαθυρά. Αντικαθιστούν ολοένα και περισσότερο τους κρυστάλλους χαλαζία. Τα κοινότερα κεραμικά για υπέρηχους είναι: Barium titanate, Lead metaniobate, Lead zirconate και Lead zirconate titanate.

γ. Στοιχεία από Lithium Sulphate.

Είναι οι αποτελεσματικότεροι δέκτες και μέτριοι ως πομποί, αλλά δυστυχώς διαλυτοί στο νερό και θραύονται εύκολα.

### 2.3.2. Κεφαλές Υπερήχων

Ο κρύσταλλος τοποθετείται σε κατάλληλο περίβλημα και σε απόλυτη επαφή με υλικό υποστήριξης (backing material), για να επιτυγχάνεται μικρή διάρκεια παλμού. Το υλικό υποστήριξης είναι συνήθως epoxy (πλαστικό με ισχυρή απορρόφηση).

Μπροστά από τον κρύσταλλο υπάρχει ακρυλικό υλικό (perspex), προκειμένου να διαφυλάσσεται ο κρύσταλλος από τριβή/φθορά είτε σπάσιμο. Αυτό το ακρυλικό υλικό μπορεί να έχει και μορφή "σφήνας", ώστε να δίνεται η κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης στη διεπιφάνεια perspex-δοκιμίου (γωνιακές κεφαλές).

Προκειμένου να έχουμε καλύτερη επαφή κεφαλής-δοκιμίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ειδικά "παπουτσάκια" από ακρυλικό (contact shoes), με καμπυλότητα ίδια με αυτή του δοκιμίου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επίσης στοιχεία από ακρυλικό σαν "φακούς εστίασης" (focus lenses), κυλινδρικούς ή σφαιρικούς (γραμμική εστίαση και σημειακή εστίαση αντίστοιχα).

Στην περίπτωση της μεθόδου βύθισης, εκτός από τις κλασσικές κεφαλές βύθισης, έχουμε και τις περιπτώσεις συνδυασμού κεφαλής-στήλης νερού (bubbler) ή κεφαλής-ακροφυσίου (squitter/water jet) ή ακόμη και κεφαλής-ελαστικής ρόδας (wheel transducer).

Το ηλεκτρικό σήμα από και προς τον κρύσταλλο οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου (coaxial cable), για αποφυγή παρεμβολών και ηλεκτρικών θορύβων.

### 2.3.3 Κεφαλές τύπου μωσαϊκού και τύπου βούρτσας

Προκειμένου για ταυτόχρονη σάρωση μεγαλύτερης σχετικά επιφάνειας, κατασκευάζονται κεφαλές με κρυστάλλους είτε τύπου μωσαϊκού είτε τύπου βούρτσας. Οι κρύσταλλοι τύπου μωσαϊκού (mosaic transducer) αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία, τα οποία διεγείρονται είτε ταυτόχρονα είτε με συγκεκριμένη χρονική απόσταση (οπότε και μπορούν να λειτουργήσουν σαν γραμμικό άνωσμα-linear array είτε με διαφορετική εστιακή απόσταση).

Αντίθετα, κρύσταλλοι τύπου βούρτσας (paint brush transducer) αποτελούνται συνήθως από ένα μόνο στοιχείο με μεγάλο λόγο μήκους προς πλάτος. Μπορούν να κάνουν ταυτόχρονα σάρωση σε μεγάλο σχετικά μήκος του δοκιμίου, αλλά βεβαίως δεν παρέχουν την ίδια ευαισθησία και διακριτική ικανότητα όπως μικρότεροι κρύσταλλοι.

### 2.3.4 Συσκευή Υπερήχων

Η σκανδάλη (trigger/timer) δίνει το έναυσμα για κάθε παλμό σε μία γεννήτρια παλμών (Pulse generator/pulser), ο οποίος με τη σειρά του ενεργοποιεί (για ελάχιστο χρόνο σε κάθε παλμό) τον πομπό ραδιοσυχνοτήτων (που προκαλεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο κρύσταλλο της κεφαλής στο και άρα έχουμε εκπομπή υπερήχων).

Ταυτόχρονα η σκανδάλη ενεργοποιεί τη ρύθμιση χρονικής βάσης του Παλμογράφου Καθοδικών ακτινών (CRT) αλλά και προξενεί την εμφάνιση του αρχικού παλμού (initial pulse) στην οθόνη του παλμογράφου.

Εάν επιστρέφει ήχος στην κεφαλή, μετατρέπεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε ηλεκτρική τάση, η οποία ενισχύεται και οδηγείται στις πλάκες Y του παλμογράφου (οπότε εμφανίζεται ύψος σήματος ανάλογα με την ένταση του επιστρέφοντος ήχου). Το χρονικό διάστημα που παρήλθε από το έναυσμα ως την επιστροφή του ήχου, μέσω των πλακών X, τοποθετεί το σήμα στην οριζόντια κλίμακα.

Σημείωση: Πρόκειται για την συνήθη περίπτωση απεικόνισης, δηλαδή την A σάρωση (A scan). Οι μετρήσεις γίνονται πάντοτε από το μηδέν της οθόνης έως τον αριστερό πόδα του σήματος.

Η ταχύτητα του ήχου στο δοκίμιο λαμβάνεται υπόψη μέσω της βαθμονόμησης της χρονικής βάσης (οριζόντια κλίμακα της οθόνης), ώστε να απεικονίζονται πάχη υλικού παρά χρόνος. Το σήμα στην οθόνη μπορεί να είναι υπό μορφή ραδιοσυχνότητας (οπότε

και διατηρεί περισσότερες πληροφορίες από το επιστρέφον ακουστικό σήμα) ή ανορθωμένο μορφής video (ημι- είτε πλήρως ανορθωμένο).

Το ηλεκτρικό σήμα πριν τον ενισχυτή είναι της τάξεως χιλιοστών του Volt και η ενίσχυση είναι λογαριθμική. Ο ηλεκτρικός παλμός είναι της τάξεως μερικών εκατοντάδων Volts.

Η συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition rate) πρέπει να είναι μεγάλη, για να έχουμε ενισχυμένα (φωτεινά) σήματα στον παλμογράφο αλλά και δυνατότητα μεγάλης ταχύτητας σάρωσης ( $V \leq D \times \text{PRR}$ ). Εξαιρετικά μεγάλη συχνότητα επανάληψης όμως μπορεί να δημιουργήσει μη σχετικές ή ψευδείς ενδείξεις.

### 2.3.5 Υλικό Σύζευξης (Couplant)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διάδοση του υπέρηχου από την κεφαλή στο εξεταζόμενο δοκίμιο, πρέπει να παρεμβληθεί ένα Υλικό Σύζευξης (Couplant), για τους εξής λόγους:

1. Ο κυριότερος λόγος είναι η απομάκρυνση του αέρα (ακόμα και σε μορφή μικρών φυσαλίδων), ο οποίος έχει χαμηλή ακουστική αντίσταση.

Μία διεπιφάνεια με αέρα ανακλά παρά επιτρέπει τη συνέχιση της διάδοσης του υπέρηχου.

2. Το υλικό σύζευξης πρέπει να "γεμίζει" όλες τις επιφανειακές ανωμαλίες ή τραχύτητες και έτσι να επιτρέπει το ομαλό "γλίστρημα" της κεφαλής πάνω στο δοκίμιο στην μέθοδο με επαφή (contact test) και επιπλέον να μη προκαλείται γρήγορα φθορά στην κεφαλή.

Άρα το υλικό, στη μέθοδο επαφής, πρέπει να έχει και κάποιες "λιπαντικές ιδιότητες".

Οι κυριότερες ιδιότητες ενός καλού υλικού σύζευξης είναι οι εξής:

α. Ακουστική αντίσταση ενδιάμεση εκείνη της κεφαλής και του δοκιμίου (και μάλλον πιο κοντά προς το δοκίμιο).

β. Εύκολη εφαρμογή του πάνω στο δοκίμιο, χωρίς να φεύγει (ή να "τρέχει") πολύ εύκολα, αλλά επιπλέον να είναι σχετικά εύκολη η απομάκρυνση του.

γ. Να μην είναι διαβρωτικό.

δ. Να μην είναι τοξικό ή επικίνδυνο για την υγεία, γενικά.

ε. Να διαβρέχει καλά όλες τις επιφάνειες (του δοκιμίου και της κεφαλής) και να μην επιτρέπει τη δημιουργία ακόμα και πολύ μικρών φυσαλίδων.

Στη μέθοδο με βύθιση (immersion method) χρησιμοποιείται νερό σαν μέσο σύζευξης (ενδεχόμενα με διαβρεκτικό παράγοντα/ wetting agent και αντιδιαβρωτικό).

Στην μέθοδο με επαφή (contact method) χρησιμοποιείται λάδι, λίπος, γλυκερίνη, νερό μαζί με διαβρεκτικό παράγοντα. Ενδεχόμενα χρησιμοποιούνται άλλα υλικά, για την επιλογή των οποίων μεγάλο ρόλο παίζει η κατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου. Όσο πιο ανώμαλη ή τραχιά είναι η επιφάνεια του δοκιμίου, τόσο πιο παχύρρευστο (ή μεγαλύτερου ιξώδους) πρέπει να είναι το υλικό σύζευξης.

Υλικό σύζευξης υπάρχει ακόμα σε μορφή γέλης (gel) ή πάστας αλλά, για πολύ τραχιές επιφάνειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και λεπτό φύλλο ελαστικού. Οποιοδήποτε και αν είναι το υλικό σύζευξης κατά τη μέθοδο με επαφή, το στρώμα του υλικού σύζευξης πρέπει να είναι λεπτό και ομοιόμορφου πάχους, για να αποφεύγεται απώλεια ηχητικής ενέργειας ή παραμόρφωση του σήματος και δημιουργία "μή σχετικών" (conrelevant) ενδείξεων.

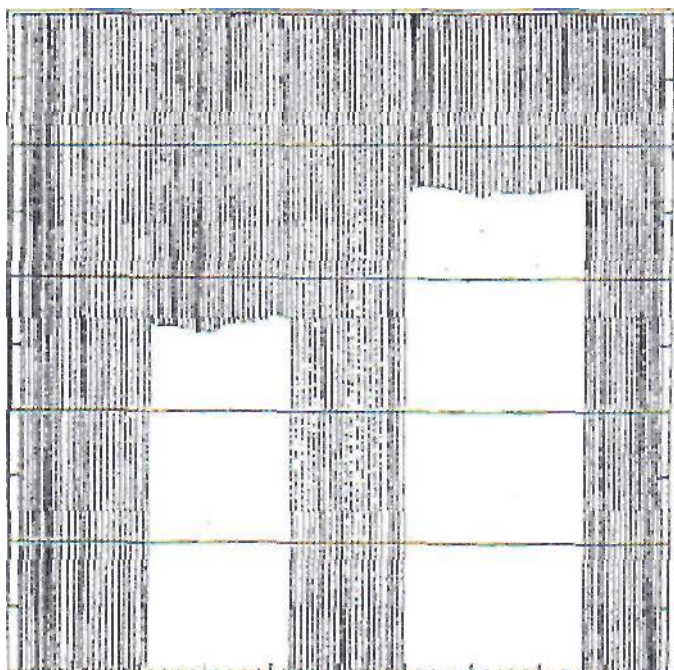
### **2.3.6 Μέθοδοι Σάρωσης (Απεικόνισης)**

Η πιο συχνή είναι η Α σάρωση (A scan), όπου στην οριζόντια κλίμακα της οθόνης (πλάκες X) απεικονίζεται η θέση του ανακλαστήρα και το ύψος του σήματος (πλάκες Y) απεικονίζει τη σχετική ένταση της ηχούς.

Η Β σάρωση (απεικόνιση, εικ. 2.1) δίνει μία τομή του δοκιμίου (πλάκες X για θέση μήκους ή πλάτους, πλάκες Y για θέση βάθους).

Η C σάρωση δίνει κάτοψη του δοκιμίου (πλάκες X και Y για τις δύο διευθύνσεις του επιπέδου του δοκιμίου).

Η σάρωση C εκτελείται συνήθως με ηλεκτρική/αυτόματη διάταξη και μέθοδο βύθισης. Το στήριγμα της κεφαλής επιτρέπει την αλλαγή γωνίας αλλά και τη μετατόπιση της κεφαλής καθ' ύψος. Το στήριγμα αυτό τοποθετείται πάνω σε φορείο, που επιτρέπει τη μετακίνηση του (άρα και της κεφαλής) κατά πλάτος του δοκιμίου. Το φορείο στηρίζεται σε γέφυρα, που μετακινείται κατά μήκος του δοκιμίου. Άρα, με αλληπάλληλες σαρώσεις κατά πλάτος του δοκιμίου και σε διαφορετικές θέσεις του μήκους του, επιτυγχάνεται (μέσω "απομνημόνευσης" των σημάτων από τη συσκευή) η αποτύπωση της κάτοψης της ασυνέχειας.



**Εικόνα 2.1:** Εικόνα Β-σάρωσης

## 2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### 2.4.1 Γεωμετρία δέσμης υπερήχων

Η δέσμη υπερήχων που παράγεται από κάθε παλμό (pulse), έχει συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά την ένταση της.

Κοντά στον κρύσταλλο η μέγιστη ένταση παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα και ελαττώνεται απότομα με την απομάκρυνση από αυτόν. Παράλληλα όμως παρουσιάζονται και τοπικά μέγιστα και ελάχιστα πιέσεως, που καλούνται πλευρικοί λωβοί (side lobes).

Η ανομοιομορφία στην κατανομή της εντάσεως (άρα και πιέσεως) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κρυστάλλου και το υλικό υποστήριξης (backing medium) πίσω από τον κρύσταλλο. Ολόκληρη αυτή η ζώνη καλείται "εγγύς ζώνη" (near field) ή ζώνη Fresnel (Fresnel zone).

Οι διακυμάνσεις της πίεσης οφείλονται σε φαινόμενα αλληλεπίδρασης (περίθλαση και συμβολή) των δονούμενων σωματιδίων του κρυστάλλου.

Για κυκλικό κρύσταλλο, το μήκος της εγγύς ζώνης  $N$  δίνεται (σε mm) από τον τύπο:

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} \quad (2.18)$$



όπου  $D$  η ενεργός διάμετρος του κρυστάλλου σε mm,  $f$  συχνότητα διέγερσης (σε MHz) και  $c$  η ταχύτητα διάδοσης (σε km/sec).

Για τετράγωνο κρύσταλλο έχουμε:

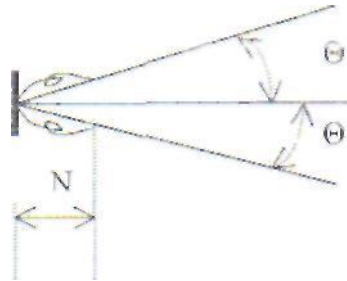
$$N = \frac{1,3 \cdot Q^2 \cdot f}{4c} \quad (2.19)$$

όπου  $Q$  η λειτουργική πλευρά του κρυστάλλου σε mm.

Η επόμενη σημαντική ζώνη είναι η ζώνη διάβασης (transition zone), όπου η πίεση του ήχου παραμένει περίπου σταθερή στον άξονα, αλλά μειώνεται κατά την απομάκρυνση του από αυτόν, κατά την εξίσωση:

$$hm\theta = K \cdot \frac{c}{D \cdot f} \quad (2.20)$$

όπου  $\theta$  η ημιγωνία (ίδη σχήμα 2.3) και  $K$  συντελεστής ίσος με 0,7 για πίεση 50% της αρχικής (-6dB), 1,08 για 10% της αρχικής (-20dB) και 1,22 για μηδενισμό της πίεσης.



**Εικόνα 2.2:** Πολικό διάγραμμα

Η ημιγωνία  $\theta$  καλείται γωνία απόκλισης (ενίοτε και ημιγωνία απόκλισης) (divergence angle) και είναι χαρακτηριστική για κάθε κρύσταλλο (συχνότητα και διάμετρο) και υλικό μετάδοσης.

Σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από  $3N$ , η πίεση στην κεντρική ακτίνα (δηλ. πάνω στον άξονα της δέσμης) μεταβάλλεται αντίστροφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης, για τα κυλινδρικά κύματα, ενώ για τα σφαιρικά μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Η πίεση ελαττώνεται επίσης, καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα της δέσμης, σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση. Η ζώνη αυτή καλείται "απώτατη ζώνη" ή ζώνη Fraunhofer (far zone/Fraunhofer zone).

Η απεικόνιση της πίεσης ηχητικής δέσμης, κατά τη διάδοση της, καλείται "πολικό διάγραμμα".

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

1. Πολύ συχνά, σε βιβλία θεωρίας Υπερήχων, θα δούμε να αγνοείται τελείως η ζώνη διάβασης και αμέσως μετά την εγγύς ζώνη να θεωρείται ότι ξεκινά η απώτατη ζώνη.
2. Υπενθυμίζουμε ότι η ένταση του ήχου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης ενώ το ύψος σήματος είναι επίσης ανάλογο της πίεσης.

$$\frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \quad \text{είτε} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{a_1}{a_2} \quad (\text{Κυλινδρικό κύμα}) \quad (2.21)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{είτε} \quad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \quad (\text{Σφαιρικό κύμα}) \quad (2.22)$$

#### 2.4.2 Αποδυνάμωση του ήχου (Attenuation)

Η αποδυνάμωση της έντασης του ήχου οφείλεται σε:

- α) λόγους γεωμετρίας (απόκλιση της δέσμης, όπως προηγουμένως εξηγήθηκε),
- β) ανάκλαση-σκέδαση στους κόκκους του υλικού και
- γ) απόσβεση μέσα στο υλικό.

Για μήκη κύματος μικρότερα του 1/3 του μεγέθους των κόκκων του υλικού, η αποδυνάμωση είναι μεγάλη και οφείλεται κυρίως σε ανακλάσεις του ήχου (φαινόμενο σκέδασης, scatter) στα όρια των κόκκων είτε στα όρια μικρο-ασυνεχειών.

Όταν το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο, η αποδυνάμωση οφείλεται κυρίως σε απόσβεση (damping) του ήχου, λόγω μετατροπής σε θερμότητα τριβής και το φαινόμενο της αποδυνάμωσης της ενέργειας του ήχου είναι λιγότερο έντονο.

Και στις δύο όμως περιπτώσεις, εξακολουθεί να υπάρχει αποδυνάμωση, κατά τον άξονα της δέσμης, για λόγους γεωμετρίας, διότι η αρχική ενέργεια "κατανέμεται" σε μεγαλύτερη επιφάνεια, άρα η ένταση και η πίεση του ήχου ελαττώνονται, όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκπομπής.

### 2.4.3 Σημείο Εξόδου και Γωνία Δέσμης Γωνιακών Κεφαλών

Πριν από τη χρήση μιας γωνιακής κεφαλής υπερήχων, είναι απαραίτητο να βρεθεί το σημείο εξόδου του κεντρικού άξονα της δέσμης από την κεφαλή (index point), καθώς και η γωνία αυτού του άξονα με την κάθετο στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Οι έλεγχοι αυτοί πρέπει να γίνονται τακτικά, διότι με τη φθορά του ακρυλικού στη βάση της κεφαλής, μπορεί να αλλάξει τόσο το σημείο εξόδου όσο και η γωνία της δέσμης. Είναι βέβαια προφανές (λόγω του Νόμου του Snell) ότι η γωνία της δέσμης εξαρτάται και από το εξεταζόμενο υλικό. Έτσι, μια εγκάρσια κεφαλή με ονομαστική γωνία  $60^\circ$ , έχει σχεδιαστεί ώστε να δίνει γωνία διάθλασης του εγκαρσίου κύματος στο χάλυβα ίση με  $60^\circ$ .

### 2.4.4 Νεκρή ζώνη (Dead Zone)

Κατά τη μέθοδο εξέτασης με επαφή (contact method), η περιοχή του υλικού πολύ κοντά στον κρύσταλλο δεν μπορεί να εξεταστεί, λόγω του ότι τα σήματα από ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια βρίσκονται στην οθόνη μέσα στο εύρος του αρχικού παλμού (initial pulse). Με την μέθοδο βύθισης (immersion method), ο αρχικός παλμός (που παράγεται από την ίδια τη συσκευή) μπορεί να απομακρυνθεί από τα σήματα της ελεύθερης επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού, με ανάλογο πάχος νερού.

Το φαινόμενο της νεκρής ζώνης μπορεί επίσης να εξουδετερωθεί με χρήση διπλών (δίδυμων) κεφαλών (dual/twin probes), οπότε η νεκρή ζώνη είναι μηδενική.

### 2.4.5 Χάραξη του σχεδίου απόκλισης της δέσμης (Beam Spread Pattern)

Για κάθε κεφαλή (probe) και υλικό διάδοσης, είναι δυνατόν, τόσο θεωρητικά όσο και κυρίως πρακτικά, να χαράξουμε το σχέδιο (διάγραμμα) απόκλισης της δέσμης (Beam spread Pattern), για 50% ή 10% (συνήθως) της πίεσης σε σχέση με την πίεση πάνω στον κεντρικό άξονα.

Θεωρητικά, τούτο γίνεται με τον υπολογισμό του μήκους  $N$  της εγγύς ζώνης και της γωνίας  $\theta$  (γωνία απόκλισης).

Πρακτικά, γίνεται με ελάττωση του σήματος κατά 50% (-6dB) ή 90% (-20 dB) και χάραξη των χαρακτηριστικών σημείων.

Το σχέδιο απόκλισης δέσμης είναι πολύ χρήσιμο, κυρίως για την οριοθέτηση των σφαλμάτων συγκολλήσεων με χρήση γωνιακής κεφαλής.

## 2.5 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

### 2.5.1 Ευαισθησία και Συχνότητα

Η ευαισθησία (sensitivity) μιας κεφαλής υπερήχων χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη ασυνέχεια (ανακλαστήρα) που μπορεί να ανιχνεύσει. Η διακριτική ικανότητα (resolution) είναι η ικανότητα διάκρισης μεταξύ δύο πολύ κοντινών ασυνεχειών (ανακλαστήρων).

Από τη σχέση

$$N = \frac{D^2 \cdot f}{4c} \quad (2.23)$$

προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος (για συχνότητα σταθερή), τόσο μεγαλώνει η εγγύς ζώνη, άρα η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα για ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια περιορίζονται. Η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα για περιοχές μετά την εγγύς ζώνη είναι μεγαλύτερες, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος.

Από τη σχέση

$$hm\alpha = \frac{k \cdot c}{D \cdot f} \quad (2.24)$$

προκύπτει ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος είτε η συχνότητα, τόσο μικραίνει η γωνία απόκλισης και επομένως η δέσμη είναι στενότερη, προσφέροντας καλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα. Το φαινόμενο όμως αυτό αντίκειται στο ότι η αποδυνάμωση του ήχου (attenuation) είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι ή συχνότητα (ή όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος), λόγω της σκέδασης (scatter).

Πάντως, για υλικά που παρουσιάζουν έντονο πρόβλημα αποδυνάμωσης του ήχου (π.χ. χονδρόκοκκα υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας και χυτό αλουμίνιο), προτιμούμε μεγάλη διάμετρο κεφαλής και χαμηλή συχνότητα.

Για εξέταση κοντά στην επιφάνεια του υλικού προτιμούμε μικρή διάμετρο (για μικρή εγγύς ζώνη), δίδυμη κεφαλή (για μηδενική νεκρή ζώνη) και μεγάλη συχνότητα (για μεγάλη ευαισθησία). Όσο μεγαλώνει το πάχος του υλικού, προτιμούμε μικρότερη συχνότητα, για μικρή γεωμετρική αποδυνάμωση του ήχου και μεγαλύτερη κεφαλή (για στενότερη δέσμη). Γενικά, όποτε είναι δυνατό, προτιμούμε μεγάλη συχνότητα, για καλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα.

Όσον αφορά τις γωνιακές κεφαλές, συνήθως χρησιμοποιούμε εγκάρσια κύματα (μέσα στο εξεταζόμενο υλικό), για μεγαλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα

(μικρότερο μήκος κύματος, μικρότερη γωνία απόκλισης-γεωμετρική αποδυνάμωση). Όταν όμως η αποδυνάμωση λόγω σκέδασης γίνει πολύ μεγάλη (λόγω χονδροκόκκου υλικού), τότε χρησιμοποιούμε γωνιακή δέσμη διαμηκών κυμάτων (μέσα στο υλικό).

### 2.5.2 Διάρκεια παλμού

Ο παλμός πρέπει να αποσβένεται (dampen) γρήγορα, τόσο στο ηλεκτρικό κύκλωμα όσο και στον πομπό, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Πάντως, παλμός μεγαλύτερης διάρκειας παρουσιάζει μικρότερη αποδυνάμωση και άρα διείσδυση σε μεγαλύτερο βάθος.

### 2.5.3 Απόκριση Δέκτη

Σε σχέση με την ιδιοσυχνότητά του (που καθορίζεται από το πάχος του,  $T=\lambda/2$ ), ένας κρύσταλλος αποκρίνεται (πάλλεται) και σε άλλες συχνότητες, γύρω από την κεντρική.

Ένα χαρακτηριστικό του συστήματος υπερήχων είναι το εύρος των συχνοτήτων που μεταδίδονται στην οθόνη του παλμογράφου, χωρίς σημαντική μεταβολή. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται σαν μεγάλου εύρους (broad-banded), όταν αυτό το πεδίο συχνοτήτων είναι μεγάλο, οπότε και έχουμε πιστή αναπαράσταση του ανακλώμενου ήχου, υψηλή διακριτική ικανότητα (σε βάθος) αλλά και υψηλό θόρυβο. Μικρή διάρκεια παλμού δίνει μεγάλο εύρος απόκρισης. Αντίθετα, όταν η απόκριση είναι σημαντική μόνο πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα, τότε μιλάμε για στενό εύρος (narrow-banded) και υπάρχει σημαντική παραμόρφωση σημάτων αλλά μεγαλύτερη διείσδυση στο υλικό. Ο δείκτης ποιότητας  $Q$  ενός κρυστάλλου ορίζεται σαν:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

(2.25)

όπου  $f_0$  η ιδιοσυχνότητα και  $f_2, f_1$  οι συχνότητες που δίνουν ένταση σήματος ίση με το 70% της εντάσεως που δίνει η ιδιοσυχνότητα.

Το μέγεθος  $f_2-f_1$  ονομάζεται "εύρος συχνοτήτων" (band width). Όσο γρηγορότερα αποσβένεται ο παλμός, τόσο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων έχουμε, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα (σε βάθος) αλλά και μικρότερη η διάβαση στο υλικό. Επίσης, συστήματα με μεγάλο εύρος συχνοτήτων παρουσιάζουν μεγάλο θόρυβο και επομένως πρακτικά μικρότερη ευαισθησία.

Συστήματα μικρού εύρους συχνοτήτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία, μεγαλύτερη διάβαση, μικρότερο θόρυβο αλλά και μεγαλύτερη παραμόρφωση του σήματος, που οδηγεί σε χειρότερη διακριτική ικανότητα σε βάθος, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Μάλιστα, στις περιπτώσεις μικρού εύρους συχνοτήτων, ενίοτε ο παλμός, λόγω της μεγάλης διάρκειας του, μπορεί και να αποκρύψει είτε να αλλοιώσει τελείως σήματα από ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια.

Όμως, συστήματα μικρού εύρους συχνοτήτων παρουσιάζουν καλή διακριτική ικανότητα, όταν οι ασυνέχειες βρίσκονται περίπου στο ίδιο επίπεδο (lateral resolution).

#### **2.5.4 Σύνοψη σχέσης χαρακτηριστικών κεφαλής και καταλληλότητας**

##### **- Μεγάλη συχνότητα**

- Καλή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα
- Στενή δέσμη (μικρή γωνία απόκλισης)
- Μεγάλη εγγύς ζώνη
- Μικρή διείσδυση / μεγάλη αποδυνάμωση λόγω σκέδασης

##### **- Μεγάλη διάμετρος κεφαλής**

- Μεγάλη διείσδυση / ισχυρότερο σήμα
- Αρχικά φαρδεια δέσμη αλλά κατόπιν στενότερη (μικρή γωνία απόκλισης άρα καλή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα σε σχέση με μικρή κεφαλή και μεγάλα βάθη, αλλά κακή κοντά στην επιφάνεια)

- Μεγάλη εγγύς ζώνη

##### **- Δίδυμη κεφαλή**

- Μηδενική νεκρή ζώνη, ιδανική για έλεγχο κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου

##### **- Κεφαλές μεγάλου εύρους (broad banded)**

- Σύντομος παλμός και άρα μικρή νεκρή ζώνη, υψηλή διακριτική ικανότητα κοντά στην επιφάνεια

- Μικρός συντελεστής Q, υψηλή ευαισθησία σε βάθος και πιστή απόκριση σήματος

- Μικρή διείσδυση
- Υψηλός θόρυβος

## 2.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

### 2.6.1 Μέθοδοι Ελέγχου

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η μέθοδος επαφής, με άμεση επαφή της κεφαλής πάνω στο δοκίμιο (αφού παρεμβληθεί λεπτό και ομοιόμορφο στρώμα υλικού σύζευξης).

Σε αντιδιαστολή, υπάρχει η μέθοδος βύθισης, όπου τόσο η κεφαλή όσο και το δοκίμιο βρίσκονται μέσα στο υλικό σύζευξης (νερό με ενδεχόμενους διαβρεκτικούς και αντισκωριακούς παράγοντες). Παραλλαγές της μεθόδου βύθισης είναι της στήλης νερού (bubbler), ακροφυσίου (squirter, εικ. 2.3) και ελαστικής ρόδας (wheel).

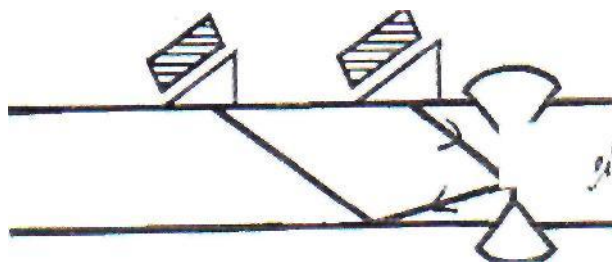
Η μέθοδος βύθισης είναι ιδανική για μικρού μεγέθους και συμμετρικά δοκίμια, ιδιαίτερα μάλιστα σε αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου και Β ή C σάρωση.

### 2.6.2 Τεχνικές Ελέγχου

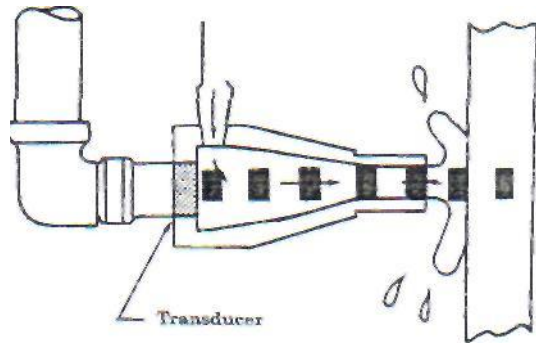
Η μέθοδος παλμού-ηχούς χρησιμοποιεί την επιστρεφόμενη ηχώ (πίσω ηχώ είτε ηχώ από ασυνέχεια στο δοκίμιο).

Η μέθοδος διάβασης χρησιμοποιεί τον ήχο που διαπερνά το δοκίμιο (απουσία σήματος σημαίνει ύπαρξη ασυνέχειας σε άγνωστο βάθος μέσα στο δοκίμιο).

Όταν χρησιμοποιείται άλλη κεφαλή ως πομπός και άλλη ως δέκτης αλλά από την ίδια πλευρά του δοκιμίου, η μέθοδος λέγεται pitch-catch (π.χ. tandem για κεντρική περιοχή υλικών ή συγκολλήσεων, εικ. 2.2).



**Εικόνα 2.3:** Τεχνική pitch-catch (tandem)



**Εικόνα 2.4:** Τεχνική ακροφυσίου



## 2.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

### 2.7.1 Καμπύλη Διόρθωσης Απόστασης - Έντασης (Καμπύλη DAC)

Στην περίπτωση της Α σάρωσης η ένταση του ανακλώμενου ήχου είναι τόσο μικρότερη, όσο βαθύτερα στο υλικό βρίσκεται ο ανακλαστήρας (λόγω αποδυνάμωσης). Προκειμένου να μπορούμε να συγκρίνουμε μεγέθη ανακλαστήρων (ποιοτικά και όχι ποσοτικά) που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη, κατασκευάζουμε την καμπύλη DAC, χρησιμοποιώντας είτε οπές επίπεδου πυθμένα (flat bottomed holes), στην περίπτωση των κάθετων κεφαλών, είτε πλευρικές οπές (side drilled holes) στην περίπτωση των γωνιακών κεφαλών.

Το υψηλότερο σήμα (συνήθως από την κοντινότερη οπή) τοποθετείται στο 80% της οθόνης και κατόπιν, με σταθερή ενίσχυση, σημειώνουμε το ύψος των υπόλοιπων οπών. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται 100% καμπύλη DAC ενώ με μετάθεση της στο ήμισυ έχουμε την ομόλογη καμπύλη 50% (-6 dB).

Οι καμπύλες DAC (ξεχωριστή για κάθε συσκευή, κεφαλή και υλικό) χρησιμοποιούνται για την αποδοχή ή απόρριψη σφάλματος, βάσει των σχετικών οδηγιών της χρησιμοποιούμενης προδιαγραφής (π.χ. απορρίπτουμε ό,τι υπερβαίνει την καμπύλη 100% DAC ή την 50% DAC).

### 2.7.2 Διάγραμμα Απόστασης - Ενίσχυσης - Μεγέθους (Διάγραμμα DGS η AVG)

Πρόκειται για διάγραμμα που χρησιμοποιεί το μέγεθος της εγγύς ζώνης και τη διαφορά αποδυνάμωσης πίσω ηχούς - ασυνέχειας, προκειμένου να συγκρίνει (ποσοτικά) το μέγεθος του πομπού και το μέγεθος της ασυνέχειας.

Από την εταιρεία Krautkraemer δίνονται και οι λεγόμενες κλίμακες DGS (DGS scales), για κάθε κεφαλή ξεχωριστά, όπου γίνεται σύγκριση του μεγέθους της ασυνέχειας και πρότυπων ανακλαστήρων διαφόρων μεγεθών (π.χ. διαμέτρου 1, 2 ή 3 mm), υπό την προϋπόθεση φυσικά, ότι η φύση και η γωνία της ασυνέχειας (ως προς την προσπίπτουσα δέσμη) είναι ίδια με αυτές του πρότυπου ανακλαστήρα. Οι κλίμακες DGS είναι αποδεκτές από ορισμένες μόνο προδιαγραφές (κυρίως γερμανικές και πάντως όχι αμερικάνικες) για την αποδοχή-απόρριψη ασυνέχειας υλικού.

## 2.8 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

### 2.8.1 Έλεγχος κυλινδρικών δοκιμίων

Προκειμένου για κυλινδρικά δοκίμια, εάν χρησιμοποιηθεί κάθετη κεφαλή στο ένα άκρο τους και εφόσον έχουν αρκετό μήκος, θα παρατηρηθούν αλληπάλληλες μετατροπές τύπου του ήχου, καθώς ή δέσμη θα "ανοίγει" και θα κτυπά στα πλευρικά του τοιχώματα. Έτσι θα έχουμε παραγωγή πολλαπλών σημάτων στην οθόνη, χωρίς να είναι ο έλεγχος αποτελεσματικός.

Κυλινδρικά δοκίμια ελέγχονται συνήθως με τεχνική βύθισης (immersion testing), χρήση κάθετης κεφαλής και γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από την πρώτη κρίσιμη, ώστε να έχουμε εγκάρσιο κύμα μέσα στο δοκίμιο.

### 2.8.2 Έλεγχος Συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις ελέγχονται σε τρία διακεκριμένα βήματα:

1. Έλεγχος με κάθετη κεφαλή για εύρεση ανακλαστήρων στο μέταλλο βάσεως, σε όλη τη ζώνη του υλικού από όπου θα περάσει γωνιακή δέσμη.
2. Έλεγχος της ρίζας της συγκόλλησης, σε απόσταση μισού βήματος και προσέχοντας για σήματα που έρχονται λίγο πριν από την πλήρη διαδρομή δέσμης. Μισό βήμα ( $1/2 \text{ skip}$ ) =  $t \times \tan\theta$ , όπου  $t$  το πάχος του υλικού και  $\theta$  η γωνία διάθλασης της δέσμης στο υλικό.

$$\text{Διαδρομή δέσμης : } S = t/\cos\theta \quad (2.26)$$

Ο έλεγχος γίνεται και από δεξιά και από αριστερά της συγκόλλησης.

3. Έλεγχος του σώματος της συγκόλλησης.

Γίνεται σάρωση σε απόσταση μισού βήματος έως ενός βήματος (πλέον το μισό του ανοίγματος - πλάτους της συγκόλλησης) και προσέχοντας για σήματα που έρχονται μεταξύ ενός και δύο πλήρων διαδρομών δέσμης. Ο έλεγχος επαναλαμβάνεται από δεξιά και αριστερά και εκτελείται με δύο τουλάχιστον κεφαλές (διαφορετικής γωνίας διάθλασης).

Για λεπτά και μεσαία πάχη, αρκούν μία ή δύο το πολύ ευθείες σαρώσεις, παράλληλες στον άξονα της συγκόλλησης (προτιμότερη τεχνική από το ζίκ-ζάκ), σε διαφορετικές αποστάσεις από τον άξονα, ώστε να σαρωθεί ολόκληρο το σώμα της συγκόλλησης.

Προσοχή στα σήματα στη θέση  $1 \text{ skip} - v/2$  και  $1 \text{ skip} + v/2$  (ίσως έρχονται από

επιφανειακές υποκοπές - undercut) και στα σήματα στο 1 skip ακριβώς (ίσως έρχονται από τις επιφανειακές "ρυτιδώσεις" της συγκόλλησης). Κάνοντας απόσβεση (dampening) με λίγο υλικό σύζευξης και το δάχτυλο μας, θα δούμε αμέσως να "παίζουν" ή να χάνονται τελείως τέτοια σήματα.

### **2.8.3. Έλεγχος χυτών**

Τα χυτά αντικείμενα, εφόσον δεν παρουσιάζουν υπερβολική αποδυνάμωση, ελέγχονται κυρίως με κάθετη κεφαλή για την ύπαρξη εγκλεισμάτων, πόρων και διακενώσεων συστολής. Συχνά χρησιμοποιείται ως ένδειξη ύπαρξης ασυνέχειας η απώλεια της πίσω ηχούς, παρά τυχόν ανακλώμενα σήματα.

Ως τεχνική διαστασιολόγησης χρησιμοποιείται κυρίως αυτή των  $-6\text{dB}$  (ακόμη και όταν διαστασιολογούμε βάσει απώλειας πίσω ηχούς).

Γωνιακές κεφαλές χρησιμοποιούνται μόνο για την εύρεση τυχόν ρηγμάτων, ιδιαίτερα στις θέσεις αλλαγής της διατομής (θερμορωγμές).

### **2.8.4 Ηχοδυναμικό ίχνος και ερμηνεία σήματος συγκολλήσεων**

Είναι δυνατό να ερμηνευτεί ένα σήμα προερχόμενο από ασυνέχεια συγκολλήσεων από την εμφάνιση του σε A-scan και την αλλαγή του, καθώς γίνεται σάρωση σε διάφορες διευθύνσεις.

Θα ακολουθήσουμε τρεις σαρώσεις, αφού βρούμε τη θέση κατά μήκος αλλά και εγκάρσια του άξονα της συγκόλλησης στην οποία έχουμε μέγιστο παλμό στην οθόνη, με την δέσμη κάθετη στον άξονα της συγκόλλησης .

Σάρωση N°1: Παράλληλα στον άξονα της συγκόλλησης

Σάρωση N°2: Πλησιάζοντας ή απομακρυνόμενοι από τον άξονα της συγκόλλησης

Σάρωση N°3: Μικρή περιστροφή της κεφαλής.

## 2.8.5 Σήματα υπερήχων από Διακένωση Συστολής χυτών

Η διακένωση συστολής στα χυτά είναι δυνατόν να δώσει αναγνωρίσιμους παλμούς στην οθόνη υπερήχων, συνήθως της μορφής του παρατιθέμενου συστήματος, δηλ. αλληπάλληλους παλμούς σε διαφορετικά βάθη, με μικρό σχετικά ύψος ο καθένας. Πολύ συχνά όμως βλέπουμε απλώς ένα αρκετά εκτεταμένο και υψηλό "γρασίδι".

Επομένως, συχνά δεν είναι δυνατό να αποδείξουμε την ύπαρξη διακένωσης

συστολής χρησιμοποιώντας τις τυχόν ανακλάσεις επί της οθόνης(πολύ περισσότερο μάλιστα να τη διαστασιολογήσουμε). Και γι' αυτό χρησιμοποιούμε τόσο σαν απόδειξη όσο και σαν εργαλείο διαστασιολόγησης την απώλεια της πίσω ηχούς.

## 2.9 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Το βρετανικό πρότυπο BS4331:1978 Part 1 μας προσφέρει αρκετές πληροφορίες για την αξιολόγηση στο πεδίο (on site) των χαρακτηριστικών απόδοσης τόσο των συσκευών όσο και άλλου εξοπλισμού υπερήχων (π.χ. κεφαλών υπερήχων).

Για να εκτελεστούν οι τεχνικές του περιγράφονται, απαιτούνται τα διάφορα δοκίμια βαθμονόμησης του επίσης βρετανικού προτύπου BS2704.

Στη συνέχεια καταγράφουμε συνοπτικά τους διάφορους ελέγχους που προβλέπονται από το πρότυπο BS4331 -Μέρος 1.

1. Έλεγχος γραμμικότητας της χρονικής βάσης συσκευής υπερήχων. Εκτελείται με κάθετη κεφαλή και δοκίμιο βαθμονόμησης A2 είτε A4, χρησιμοποιώντας τα πολλαπλά σήματα πίσω ήχους. Απαγορεύονται αποκλίσεις μεγαλύτερες του  $\pm 2$  %, στο χρησιμοποιούμενο εύρος της οθόνης. Ο έλεγχος γίνεται τουλάχιστον εβδομαδιαία.

2. Βαθμονόμηση της χρονικής βάσης συσκευής υπερήχων. Εκτελείται επίσης με δοκίμια βαθμονόμησης A2 είτε A4. Πρέπει να είναι επιτυχής με ακρίβεια όχι χειρότερη από  $\pm 2$ %. Εκτελείται ημερήσια είτε σε κάθε αλλαγή κεφαλής.

3. Έλεγχος γραμμικότητας της ενίσχυσης (gain) της συσκευής. Εκτελείται με χρήση οποιουδήποτε δοκιμίου βαθμονόμησης που περιέχει ένα μικρό ανακλαστήρα(π.χ. σπή 1.5 mm του A2 είτε σπή 5 mm του A4). Εκτελείται τουλάχιστον εβδομαδιαία.

4. Εύρεση του σημείου εξόδου(index point) της κεφαλής.

Πρόκειται για το σημείο της κεφαλής από όπου εξέρχεται ο κεντρικός άξονας της δέσμης. Όσον αφορά τις γωνιακές κεφαλές, λόγω φθοράς του ακρυλικού πέλματος, το σημείο εξόδου αλλάζει και επομένως είναι απαραίτητο να το βρίσκουμε τουλάχιστον ημερησία, με χρήση δοκιμίου A2 είτε A4. Ανεκτή απόκλιση  $\pm 1,5^\circ$ .

#### 5. Εύρεση της γωνίας της δέσμης γωνιακής κεφαλής.

Πρόκειται για την εύρεση της γωνίας διάθλασης του κεντρικού άξονα δέσμης γωνιακής κεφαλής. Χρησιμοποιείται το δοκίμιο A5, ενώ για γρήγορο και μη ακριβή έλεγχο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δοκίμια A2 και A4. Συνιστάται έλεγχος σε ημερησία βάση. Ανεκτή απόκλιση  $\pm 1,5^\circ$ .

#### 6. Έλεγχος ευαισθησίας και λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio).

Ελέγχεται το σύστημα κεφαλής-συσσκευής υπερήχων. Χρησιμοποιούνται τα δοκίμια A2 (με οπή 1,5 mm) είτε A4 (με οπή 1,5 mm είτε 5 mm) αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το δοκίμιο A5 είτε, για ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια, το δοκίμιο A6.

Συνιστάται να εκτελείται τουλάχιστον μία φορά την ημέρα, για κάθε κεφαλή.

#### 7. Έλεγχος ευθυγράμμισης της δέσμης (beam alignment).

Γίνεται λεπτομερειακά σύμφωνα με το πρότυπο BS4331:Part3 είτε γρήγορα αλλά χωρίς ακρίβεια σύμφωνα με το πρότυπο BS4331:Part1 και τα δοκίμια A2 είτε A4. Πρόκειται για τον έλεγχο του κατά πόσο ο άξονας της δέσμης γωνιακής κεφαλής είναι παράλληλος ή όχι (συνήθως λόγω φθοράς του ακρυλικού πέλματος) με την πλευρά της κεφαλής. Εκτελείται εβδομαδιαία.

#### 8. Επαλήθευση του διαγράμματος απόκλισης δέσμης στο κάθετο επίπεδο.

Εκτελείται με δοκίμιο A2, A4 είτε A5 και χρήση της σχετικής πλευρικής οπής. Χρησιμοποιείται η μέθοδος  $-20\text{dB}$  και συνιστάται να γίνεται σε ημερησία βάση.

#### 9. Διάρκεια του παλμού (pulse duration).

Εκτελείται σε συνδυασμό κεφαλής-συσσκευής με χρήση δοκιμίου A2 είτε A4. Προκειμένου για κάθετες κεφαλές, χρησιμοποιούνται πολλαπλά σήματα πίσω ηχούς ενώ για γωνιακές κεφαλές η πλευρική οπή του δοκιμίου. Πρακτικά μετράται το πλάτος του κάθε παλμού σε mm ενώ βεβαίως αυτό μπορεί να μετατραπεί και σε msec. Συνιστάται ημερησίου έλεγχος των γωνιακών κεφαλών. Ένας πιο εμπειριστωμένος έλεγχος μπορεί να γίνει κατά το πρότυπο BS4331:Part3.

#### 10. Έλεγχος διακριτικής ικανότητας

Εκτελείται σύμφωνα με το πρότυπο BS4331 - Μέρος 3, με χρήση του δοκιμίου A7.

## 3.ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανική ραδιογραφία (Radiography Testing - RT) είναι η παλαιότερη από τις σύγχρονες μεθόδους Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών (ΜΚΔ). Οι ακτίνες - Χ ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον W.C. Roentgen και οι ακτίνες -γ (όπως ονομάστηκαν αργότερα) από τον Becquerel το 1896.

Οι πρώτες εφαρμογές των ακτινών -Χ (σε φωτογραφικό φιλμ αλλά και ως φθοροσκοπία) ξεκίνησαν ήδη το 1896 (από τον Roentgen) αλλά βρήκαν μεγάλη εφαρμογή κατά την διάρκεια και μετά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο.

Παρότι έχουν ανακαλυφθεί πολλές άλλες μέθοδοι ΜΚΔ και παρά τα αρκετά μειονεκτήματα της ραδιογραφίας, εξακολουθεί να είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, ειδικά μάλιστα για νέες και κρίσιμες κατασκευές.

#### 3.1.2 Ιδιότητες των ακτινών -Χ και -γ

1. Πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αποτελούμενη από το μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που περιλαμβάνει μήκη κύματος μικρότερα από αυτά της υπεριώδους ακτινοβολίας και μεγαλύτερα από αυτά της κοσμικής. Μπορούν να θεωρηθούν είτε σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα είτε σαν εκπομπή φωτονίων(πακέτων ενέργειας).

Το μήκος κύματος και η συχνότητα σχετίζονται με την ταχύτητα μετάδοσης με τον τύπο  $c = \lambda \times f$  , όπου c η ταχύτητα του φωτός, λ και f το μήκος κύματος και η συχνότητα του κύματος αντίστοιχα.

Η ενέργεια κάθε φωτονίου δίνεται από τον τύπο:

$$E = h \times f \quad (3.1)$$

όπου h η σταθερά του Planck και f η συχνότητα. Οι ακτίνες -Χ έχουν μήκος κύματος μεταξύ 10 και 0.001 Å (1 Angstrom = 0.1 nm) και οι ακτίνες -γ μεταξύ 1Å και 0.001Å.

2. Ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και σε ευθεία γραμμή.

3. Δεν μπορούν να ανιχνευθούν από τις ανθρώπινες αισθήσεις (όραση, ακοή, αφή κλπ).

4. Προκαλούν ιονισμό στο μέσο που ταξιδεύουν (αέρας, χάλυβας, φωτογραφικό γαλάκτωμα κλπ).
5. Επιδρούν στο φωτογραφικό φιλμ.
6. Είναι βλαβερές για τους ζωντανούς ιστούς.
7. Διασχίζουν πολλά υλικά (π.χ. μέταλλα) και απορροφώνται εν μέρει από αυτά, ανάλογα με το υλικό και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ανάκλαση και η διάθλαση, παρότι είναι θεωρητικά δυνατό να συμβούν, δεν είναι σημαντικές.
8. Σαν ακτινοβολία, οι ακτίνες -X και η -γ είναι της ίδιας φύσεως και διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο παραγωγής τους

### 3.1.3 Απορρόφηση των ακτίνων -X και -γ

Οι ακτίνες -X και -γ απορροφώνται από την ύλη που διασχίζουν κατά την εξίσωση:

$$I_t = I_0 \exp(-\mu x), \text{ είτε } I_t = I_0 \times e^{(-\mu x)} \quad (3.2)$$

όπου  $I_t$ , η ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας,  $I_0$  η ένταση της προσπίπτουσας,  $x$  το πάχος του υλικού και  $\mu$  ο συντελεστής γραμμικής απορρόφησης (σταθερός για δεδομένο μήκος κύματος, ατομικό αριθμό υλικού και πυκνότητα του υλικού).

Ο νόμος της απορρόφησης είναι εκθετικός, που σημαίνει ότι μικρή διαφορά πάχους στο ραδιογραφούμενο αντικείμενο μπορεί να δώσει σημαντική διαφορά στην ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την ευθεία μετάδοση της ακτινοβολίας, καθιστά δυνατή τη μέθοδο της ραδιογραφίας.

Επομένως η ραδιογραφική εικόνα μπορεί να δείξει διαφορές πάχους είτε ύπαρξη διαφορετικού υλικού κατά την διεύθυνση και μόνο της ακτινοβολίας. Αυτό καθιστά τη μέθοδο εξαιρετικά ευαίσθητη σε τρισδιάστατα (ογκομετρικά) σφάλματα υλικών (π.χ. πόροι/αέρια, εγκλείσματα/ξένες ύλες, διακενώσεις/κενό) αλλά και στην περίπτωση επίπεδων σφαλμάτων που η διεύθυνση τους δεν αποκλίνει σημαντικά από τη διεύθυνση της ακτινοβολίας (π.χ. ατελής τήξη συγκόλλησης και ρήγματα κατάλληλου προσανατολισμού).

Η μέθοδος όμως είναι προβληματική στην περίπτωση επίπεδων σφαλμάτων με απόκλιση (πρακτικά πάνω από 8 μοίρες) από τη διεύθυνση της ακτινοβολίας.

Μία σημαντική επομένως «παρεξήγηση» είναι η προτίμηση της χρήσης ραδιογραφίας για ανεύρεση ατελούς τήξης συγκολλήσεων (ενδείκνυται ο υπέρηχος)

αλλά και ρηγματών (συνιστάται υπέρηχος είτε μαγνητικά/διδεισδυτικά για επιφανειακά ρήγματα).

## 3.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ

### 3.2.1 Σκέδαση των ακτινών -X και -γ

Οι ακτίνες -X και -γ, καθώς διασχίζουν την ύλη, απορροφώνται προκαλώντας ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα φαινόμενα:

α) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (ή φωτοηλεκτρική απορρόφηση). Εμφανίζεται σε ακτίνες χαμηλής ενέργειας.

Απορροφάται ένα φωτόνιο ακτινοβολίας εξωθώντας ένα ηλεκτρόνιο έξω από το άτομο του.

β) Σκέδαση (ή φαινόμενο Compton). Απορροφάται ένα φωτόνιο και εκπέμπεται ένα φωτόνιο μικρότερης ενέργειας και ένα ηλεκτρόνιο. Εμφανίζεται σε ακτίνες μέσης ενέργειας και η δευτερογενής ακτινοβολία έχει διεύθυνση διαφορετική από την προσπίπτουσα (και γι' αυτό ο όρος σκέδαση).

γ) Δίδυμη γένεση (παραγωγή ζευγών).

Παρουσιάζεται σε ακτίνες υψηλής ενέργειας και η απορρόφηση ενός φωτονίου συνεπάγεται την εκπομπή από το άτομο ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου (ίδιο σωματίδιο με το ηλεκτρόνιο αλλά με θετικό φορτίο). Τα εκπεμπόμενα ποζιτρόνια σχεδόν ακαριαία αντιδρούν με άλλα ηλεκτρόνια και αλληλοεξουδετερώνονται-εξαυλώνονται παράγοντας φωτόνια.

Στη βιομηχανική ραδιογραφία το συχνότερο φαινόμενο είναι το Compton. Οι ανωτέρω μηχανισμοί είναι οι βασικοί μηχανισμοί απορρόφησης των ακτινών -X και -γ από την ύλη και συνεπάγονται τα εξής:

α) Αλλαγή της διεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Γι' αυτό το λόγο ονομάζονται συνοπτικά «σκέδαση».

β) Παραγωγή ιόντων λόγω της απελευθέρωσης ηλεκτρονίων από τα άτομα στα οποία προσπίπτει η αρχική ακτίνα -X ή -γ. Γι' αυτό το λόγο οι ακτίνες -X και -γ ονομάζονται ιονίζουσες (ή ιοντίζουσες) ακτινοβολίες.

Όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη ραδιογραφία (επίδραση στο φωτογραφικό γαλάκτωμα, επικινδυνότητα για τον άνθρωπο κ.α.) έχουν να κάνουν με τον ιονισμό που προκαλούν, κατά την απορρόφηση τους από την ύλη.



### 3.2.2 Διευθύνσεις σκέδασης

Σκεδαζόμενη ακτινοβολία (διαφορετικής διεύθυνσης από την προσπίπτουσα) μπορούμε να έχουμε (βάσει των ανωτέρω τριών φαινομένων) από διάφορες πηγές, όπως:

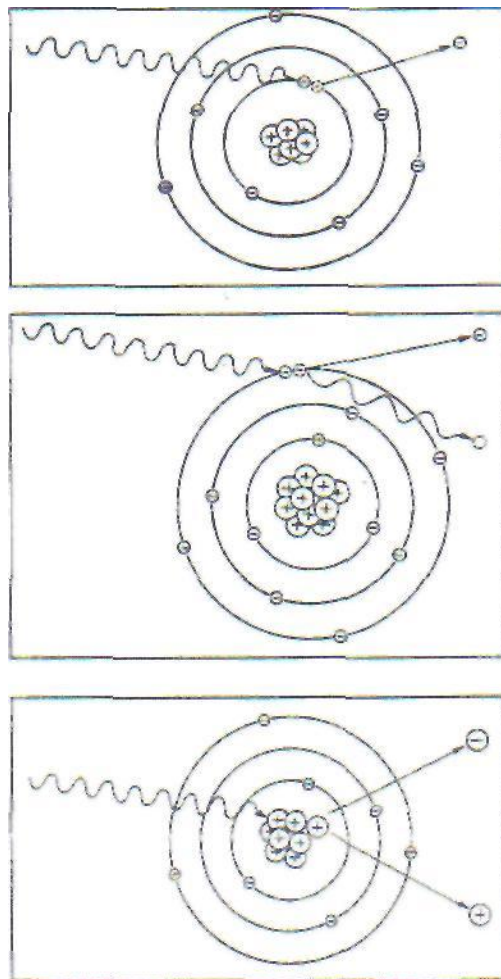
α) Το ίδιο το ραδιογραφούμενο αντικείμενο ή ό,τι βρίσκεται μπροστά από το φιλμ. Ονομάζεται εσωτερική ή εμπρόσθια σκέδαση (internal/forward scatter) και προκαλεί την ελάττωση της ευκρίνειας και αντίθεσης της εικόνας, παρότι αυξάνει σημαντικά την αμαύρωση (πυκνότητα) του φιλμ. Προλαμβάνεται με την τοποθέτηση φίλτρου (φύλλο αλουμινίου ή πολύ λεπτό φύλλο μολύβδου είτε χαλκού) μεταξύ πηγής και αντικειμένου (αν και αυτό σημαίνει σκλήρυνση της ακτινοβολίας και επομένως χειρότερη αντίθεση, όπως θα δούμε παρακάτω).

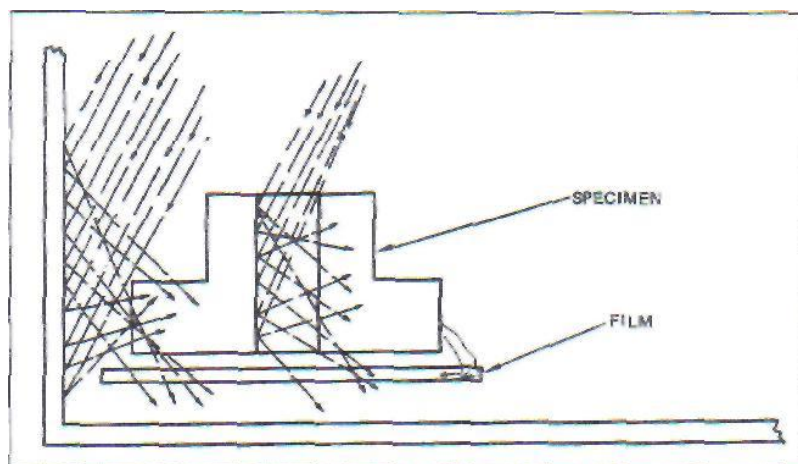
β) Πλευρική σκέδαση (side scatter). Προκαλείται από τους πλαϊνούς τοίχους και υλικά αλλά και από τα ίδια τα άκρα του ραδιογραφούμενου αντικειμένου (ή οπές κατά τη διεύθυνση της ακτινοβολίας). Μπορεί να χαλάσει την ευκρίνεια και αντίθεση της εικόνας, ιδιαίτερα μάλιστα εάν το φιλμ δεν είναι ακριβώς κομμένο στα μέτρα του δοκιμίου και βγαίνει έξω από αυτό. Προλαμβάνεται τοποθετώντας σκάγια μολύβδου ή πηλό βαρίου ή χοντρά φύλλα μολύβδου γύρω από το υλικό είτε στις οπές του.

γ) Οπίσθια σκέδαση. Πρόκειται για σκέδαση που προξενείται από τα υλικά πίσω από το φιλμ και είναι πολύ σημαντικός εχθρός της αντίθεσης. Οι σχετικές προδιαγραφές ορίζουν ότι πρέπει να τοποθετείται ένα μολύβδινο γράμμα Β συγκεκριμένων διαστάσεων και ιδίως πάχους (συνήθως 1,5 - 1,6 mm τουλάχιστον και ενίοτε έως 3,2 mm), πίσω από το φιλμ ή την κασέτα. Η εμφάνιση ενός φωτεινού "B" στο ραδιογράφημα σημαίνει ότι ραδιογραφήθηκε το μολύβδινο γράμμα από την αντίθετη διεύθυνση από ό,τι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και επομένως το ραδιογράφημα απορρίπτεται λόγω υπερβολικής οπίσθιας σκέδασης (backscatter).

Προλαμβάνεται σχετικά εύκολα, με τοποθέτηση μολύβδινου φύλλου πάχους 3-6mm πίσω από το φιλμ ή την κασέτα.

Εικόνα 3.1 : Μηχανισμοί Απορρόφησης (σκέδασης)





**Εικόνα 3.2:** Πλευρική σκέδαση

### 3.3 ΑΚΤΙΝΕΣ -X

#### 3.3.1 Σωλήνες ακτίνων -X

Οι ακτίνες -X παράγονται όταν ηλεκτρόνια με μεγάλη ταχύτητα προσπίπτουν σε υλικά υψηλού ατομικού αριθμού (βαρέα υλικά). Κατά συνέπεια, για την παραγωγή ακτίνων σε κλασσικούς σωλήνες -X απαιτούνται τρία πράγματα:

α) Παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτό επιτυγχάνεται με θέρμανση ενός νήματος βολφραμίου (filament), καθώς περνά ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από αυτό, της τάξεως μερικών Αμπέρ και τάσεως λίγων volt. Είναι όμως απαραίτητο να προσανατολιστούν τα ηλεκτρόνια προς την πλευρά του υλικού όπου θα προσπέσουν (στόχος) και αυτό επιτυγχάνεται με την κεφαλή εστίασης (focusing cup), που ενεργεί σαν ηλεκτροστατικός φακός εστίασης. Το σύστημα νήματος-κεφαλής εστίασης αποτελεί την κάθοδο του σωλήνα ακτίνων -X. Η ποσότητα των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων ρυθμίζεται μέσω της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που περνά από το νήμα, μέσω ενός ρεοστάτη.

Η ροή ηλεκτρονίων που φεύγει από την κάθοδο και οδηγείται προς το υλικό με το οποίο θα συγκρουστεί (στόχο), αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα (ένταση) που καλείται μιλιαμπεράζ (συμβολίζεται ως mA).

β) Η ύπαρξη ενός «στόχου» με τον οποίο θα συγκρουστούν τα ηλεκτρόνια. Στους κλασσικούς σωλήνες -X ο στόχος (άνοδος) είναι πάλι από βολφράμιο (διότι έχει μεγάλο ατομικό αριθμό και είναι δύστηκτος), παρότι ενδεχόμενα χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά. Ο μικρός δίσκος βολφραμίου περιβάλλεται από χαλκό, για να επιτυγχάνεται άμεση απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας, που αντιστοιχεί στο 99% (τάξη μεγέθους) της προσφερόμενης ενέργειας (άρα η απόδοση μίας λυχνίας -X είναι της τάξεως του 1%).

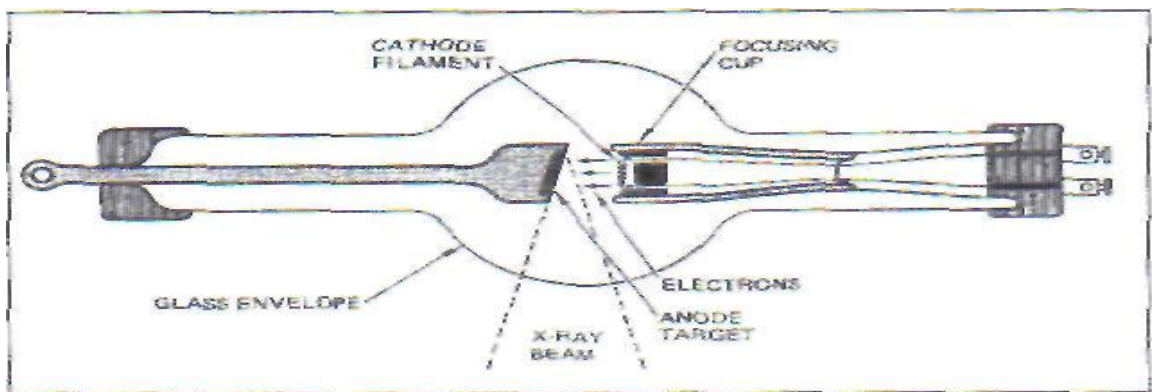
Η πλήρης απαγωγή της θερμότητας επιτυγχάνεται με κύκλωμα νερού ή λαδιού γύρω από το χαλκό ή και με ρεύμα αέρα που απάγει θερμότητα στο μονωτικό λάδι που περιβάλλει το σωλήνα.

Ο στόχος τοποθετείται απέναντι από το νήμα της καθόδου αλλά υπό γωνία ως προς τον άξονα της λυχνίας, συνήθως 70 μοιρών. Μέρος της παραγόμενης ακτινοβολίας, μέσω κατάλληλης θωράκισης της λυχνίας, αφήνεται να περνά κάθετα προς τον άξονα της λυχνίας. Αυτό γίνεται για να επιτύχουμε προβαλλόμενο μέγεθος στόχου αρκετά μικρότερο από το πραγματικό, βελτιώνοντας έτσι την ευκρίνεια της εικόνας χωρίς να μειώσουμε την επιφάνεια που δέχεται την παραγόμενη θερμότητα.

Το προβαλλόμενο μέγεθος του στόχου βρίσκεται με τη μέθοδο της κάμερας οπής καρφίτσας (pinhole camera) και ποικίλει από 1.5x1.5 mm έως 6x6 mm.

γ) Επιτάχυνση (στο κενό) των ηλεκτρονίων που παράγονται στο νήμα της καθόδου, ώστε να επιτύχουμε υψηλή ταχύτητα κατά την ώρα της πρόσκρουσης με το στόχο, διότι ουσιαστικά είναι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που θα μετατραπεί σε ενέργεια ακτινοβολίας -X (και θερμότητα). Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή υψηλής τάσης (τάξεως μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων KV) μεταξύ της καθόδου (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και στόχου / ανόδου (θετικό ηλεκτρόδιο).

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση αυτή, τόσο περισσότερο επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια, άρα έχουμε παραγωγή ακτίνων -X και μικρότερων μηκών κύματος αλλά και δραστική αύξηση της ποσότητας (έντασης) της παραγόμενης ακτινοβολίας. Αντίθετα, η αύξηση των μιλιαμπέρ δεν επηρεάζει τα παραγόμενα μήκη κύματος, αυξάνει όμως κατά ένα βαθμό την ένταση της παραγόμενης ακτινοβολίας.



**Εικόνα 3.3:** Απεικόνιση λυχνίας -X

### 3.3.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα της λυχνίας -X

Το ηλεκτρικό κύκλωμα της λυχνίας αποτελείται κυρίως από ένα αυτο-μετασχηματιστή (auto-transformer), ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης (step-up) και ένα χαμηλής τάσης (step-down). Η τροφοδοσία γίνεται με εναλλασσόμενο μονοφασικό ρεύμα 110/220 Volt προς το πρωτεύον του αυτο-μετασχηματιστή. Ο αυτο-μετασχηματιστής είναι ένας ειδικός τύπος μετασχηματιστή που επιτρέπει την εύκολη ρύθμιση της τάσεως σε συγκεκριμένο εύρος.

Το δευτερεύον του αυτο-μετασχηματιστή τροφοδοτεί το πρωτεύον του μετασχηματιστή υψηλής τάσης. Το δευτερεύον αυτού του μετασχηματιστή τροφοδοτεί με τάση χιλιάδων Volt (κιλοβόλτ) τη λυχνία -X, μεταξύ καθόδου και ανόδου. Η ρύθμιση των κιλοβόλτ επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή στον αυτο-μετασχηματιστή (που μετρώνται στο δευτερεύον του αυτο-μετασχηματιστή). Το νήμα τροφοδοτείται με χαμηλή τάση (περίπου 12 Volt) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή χαμηλής τάσης (step-down). Το πρωτεύον αυτού του μετασχηματιστή τροφοδοτείται είτε απ' ευθείας από την εξωτερική πηγή είτε από το κύκλωμα του αυτο-μετασχηματιστή. Η ρύθμιση των μιλιαμπέρ (όταν αυτή είναι διαθέσιμη και η λυχνία δεν δίνει σταθερά μιλιαμπέρ, συνήθως 5mA), επιτυγχάνεται με ένα ρεοστάτη στο κύκλωμα τροφοδοσίας του νήματος. Τα μιλιαμπέρ μετρώνται συνήθως με ένα κατάλληλα βαθμονομημένο αμπερόμετρο στο (γειωμένο) δευτερεύον του μετασχηματιστή υψηλής τάσης (step-up transformer).

### 3.3.3 Ανόρθωση του ρεύματος της λυχνίας -X

Καθώς τα ηλεκτρόνια έχουν πάντοτε αρνητικό φορτίο, προκειμένου να οδηγηθούν προς τον στόχο, πρέπει αυτός να είναι συνδεδεμένος με το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Στο κύκλωμα όμως που περιγράψαμε, η τροφοδοσία γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Επομένως το κύκλωμα θα κλείνει μόνο στο μισό του συνολικού χρόνου (και η παραγωγή ακτινών -X θα γίνεται σε ακόμη μικρότερο χρόνο). Ένα παρόμοιο κύκλωμα ονομάζεται «λυχνία αυτο-ανόρθωσης»(5ε1ί rectified).

Εναλλακτικά, είναι δυνατό να τοποθετήσουμε ανορθωτική διάταξη μετά το μετασχηματιστή υψηλής τάσης, ώστε η κάθοδος και η άνοδος να τροφοδοτούνται σταθερά με (-) και (+) αντίστοιχα. Μπορούμε να έχουμε ανόρθωση μισού κύματος (half wave) (όπως και στην αυτο-ανόρθωση), πλήρους κύματος (full wave) ή πλήρη ανόρθωση και ταυτόχρονο διπλασιασμό της τάσης (κύκλωμα Villard). Στις ανωτέρω περιπτώσεις η τάση ανόδου-καθόδου ορίζεται σαν kilovolt peak (συμβολισμός kVp) και αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση τροφοδοσίας. Ορισμένα όμως κυκλώματα ανόρθωσης επιτυγχάνουν σχεδόν σταθερή τάση ανόδου - καθόδου (μηχανές -X σταθερού δυναμικού, constant potential, συνήθως μεγάλου μεγέθους και έντασης) και έχουν απόδοση πολύ μεγαλύτερη από τις προηγούμενες.

Σημείωση: Οι περιγραφείσες λυχνίες -X είναι χαμηλής ή μέσης τάσης (5-50 και 50 - 400 kV αντίστοιχα) ενώ υπάρχουν και συσκευές -X υψηλής (ως 1600 kV) και υπέρ υψηλής τάσης (άνω των 1000 kV).

### 3.3.4 Χρήσεις λυχνιών -X

Ανάλογα με το μέγιστο κιλοβολτάζ οι λυχνίες -X μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ραδιογράφιση των κατωτέρω υλικών:

50kV: Εξαιρετικά λεπτά μέταλλα, πλαστικό, ξύλο, βιολογικά υλικά.

150kV: Ελαφρά κράματα, ως 4" αλουμινίου και 1"- 1.5" χάλυβα.

250kV: 2"-3" χάλυβα 400kV: 3"-4" χάλυβα 1000kV: 5"- 6" χάλυβα

2000kV: 6"- 8" χάλυβα

5000-30000kV: (Γραμμικοί επιταχυντές, Βήτατρον): 12" χάλυβα και άνω.

### 3.3.5 Άλλες συσκευές ακτινών -X

Γραμμικός επιταχυντής (Linear accelerator-linac): Παράγει ακτίνες -X αντίστοιχες (σε διεισδυτική ικανότητα) 1000 ως 2000kV αλλά ορισμένοι ως και 12000kV). Βήτατρον (Betatron): Οι ακτίνες -X αντιστοιχούν σε 1000 ως 30000 kV και παράγονται από ηλεκτρόνια επιταχυνόμενα σε σπειροειδή τροχιά, μέσω ισχυρών μαγνητικών πεδίων. Υπάρχουν ακόμη ηλεκτροστατικές συσκευές -X (Van de Graaf) αλλά και επιταχυντές σωματιδίων (π.χ. πυρήνων υδρογόνου και ηλίου), που χρησιμοποιούνται σπανιότερα.

### 3.3.6 Το Φάσμα των ακτινών -X

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που παράγεται από τις λυχνίες -X εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τάση (kV) μεταξύ ανόδου και καθόδου. Το ελάχιστο μήκος κύματος που παράγεται δίνεται από την σχέση:

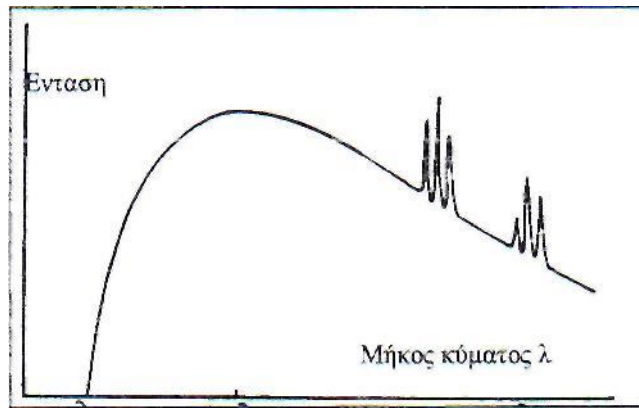
$$I_{\min} = 12.35/V \text{ (σε Angstrom)} \text{ ή } I_{\min} = 1.235/V \text{ (σε nm)} \quad (3.3)$$

Όταν οι ακτίνες -X παράγονται από τη σύγκρουση ηλεκτρονίου και πυρήνα ατόμου του στόχου, το φαινόμενο ονομάζεται "πέδηση" (Bremsstrahlung) και οδηγεί σε παραγωγή φωτονίου συχνότητας (άρα μήκους κύματος ακτινοβολίας) ανάλογης προς τις συνθήκες σύγκρουσης. Το φαινόμενο πέδησης παράγει λοιπόν ακτινοβολία διαφόρων μηκών κύματος («μείγμα», γι' αυτό ονομάζεται και λευκή ακτινοβολία).

Αύξηση της τάσεως ανόδου-καθόδου προκαλεί σημαντική αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας αλλά και προσθήκη μικρότερων μηκών κύματος (αμφότερα λόγω αύξησης της ταχύτητας των ηλεκτρονίων). Αυτό σημαίνει και αλλαγή της «ποιότητας» (αύξηση της διεισδυτικότητας) της ακτινοβολίας.

Αύξηση του ρεύματος ηλεκτρονίων που παράγονται στην κάθοδο (αύξηση των mA) δεν έχει επίδραση στην ποιότητα (μήκη κύματος) της ακτινοβολίας, αυξάνει όμως την ένταση (όχι τόσο δραστικά όσο η αύξηση των kV).

Εκτός από το φαινόμενο πέδησης και το παραγόμενο συνεχές φάσμα, παράγονται και ακτίνες -X συγκεκριμένων μηκών κύματος (χαρακτηριστική ακτινοβολία), που προέρχονται από τη σύγκρουση των ηλεκτρονίων με περιφερειακά ηλεκτρόνια του ατόμου του στόχου (και άρα διέγερση τους, με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας μήκους κύματος αντίστοιχου με την τροχιακή στάθμη στην οποία βρίσκονται και ανάλογου με το υλικό του στόχου).



**Εικόνα 3.4:** Φάσμα λυχνίας -X

### 3.4. ΑΚΤΙΝΕΣ - $\gamma$

#### 3.4.1 Φυσική του ατόμου

Το άτομο αποτελεί τη μικρότερη ενότητα ενός υλικού (στοιχείου), που διατηρεί τις χημικές ιδιότητες του στοιχείου.

Αποτελείται από τον πυρήνα και τα περιφερειακά ηλεκτρόνια, διατεταγμένα σε τροχιές συγκεκριμένης ενεργειακής στάθμης γύρω από τον πυρήνα (K-L-M-N κ.λπ). Κάθε ηλεκτρόνιο έχει ένα αρνητικό φορτίο.

Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια (με ένα θετικό φορτίο το καθένα) και νετρόνια (ουδέτερα σωματίδια λίγο μεγαλύτερης μάζας από τα πρωτόνια).

Τα ηλεκτρόνια βρίσκονται πολύ μακριά από τον πυρήνα (σε σχέση με τις διαστάσεις του πυρήνα) γι' αυτό το στερεό περιεχόμενο του ατόμου είναι μόνο 1% ή και πολύ λιγότερο ( η ύλη, όπως και το σύμπαν, είναι κατά κύριο λόγο κενό διάστημα).

Ο αριθμός πρωτονίων ενός ατόμου καθορίζει και το στοιχείο. Ονομάζεται ατομικός αριθμός και συμβολίζεται με το γράμμα Z.

Ο αριθμός νετρονίων και πρωτονίων μαζί καθορίζει το ισότοπο του στοιχείου, ονομάζεται μαζικός αριθμός και συμβολίζεται με A.

Το στοιχείο  $1H1$  αποτελείται από ένα πρωτόνιο (και άρα ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο, για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο) και  $(1-1=)$  0 νετρόνια.



Το στοιχείο  $2\text{He}4$  αποτελείται από δύο πρωτόνια (και άρα δύο ηλεκτρόνια) και  $(4-2=)$  2 νετρόνια. Τα στοιχεία στη φύση βρίσκονται συχνά σε μορφή "μείγματος" διαφόρων ισοτόπων τους (π.χ.  $1\text{H}1$ ,  $1\text{H}2$ ,  $1\text{H}3$ ).

Ορισμένα φυσικά ισότοπα (συνήθως αυτά με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 83 και μεγάλο αριθμό νετρονίων στον πυρήνα) είναι ασταθή (ραδιενεργά) και εκπέμπουν είτε σωματίδια (σωματιδιακή ακτινοβολία) είτε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ακτίνες -  $\gamma$ ), ενδεχόμενα μεταστοιχειούμενα (π.χ. το Ουράνιο καταλήγει, με ενδιάμεσα στάδια, σε Ραδόνιο).

Τα ραδιενεργά υλικά ανακαλύφθηκαν το 1896 από τον Bequerel (σε φυσικά ορυκτά ουρανίου) και μελετήθηκαν διεξοδικά από το ζεύγος Curie.

Άτομα που έχουν ηλεκτρόνια περισσότερα ή λιγότερα από τον "κανονικό" αριθμό (δηλαδή τον αριθμό πρωτονίων), δεν είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και ονομάζονται ιόντα (αρνητικό ιόν εάν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων, θετικό στην περίπτωση έλλειψης).

### 3.4.2 Σωματιδιακή ακτινοβολία

Πρόκειται για εκπομπή σωματιδίων του ατόμου, είτε από ραδιενεργά στοιχεία είτε σαν αποτέλεσμα ανθρώπινου σχεδιασμού.

Ακτίνες  $\alpha$ : Πυρήνες ηλίου ( $2\text{He}4$ ), δηλαδή πυρήνες δύο πρωτονίων και δύο νετρονίων. Είναι εξαιρετικά ιονίζουσες και επιβλαβείς, αλλά η ανθρώπινη επιδερμίδα (όπως και ένα φύλλο χαρτιού) μπορεί να τις απορροφήσει.

Ακτίνες πρωτονίων: Τα πρωτόνια έχουν μάζα περίπου 1836 φορές μεγαλύτερη από το ηλεκτρόνιο. Προκαλούν επίσης έντονο ιονισμό και έχουν διεισδυτική ικανότητα μικρότερη από εκείνη των ακτίνων  $\alpha$  και  $\beta$ .

Ακτίνες  $\beta$ : Ηλεκτρόνια πολύ υψηλής ταχύτητας (ως 99% εκείνης του φωτός). Περισσότερο διεισδυτικές από τις ακτίνες  $\alpha$  (αλλά λιγότερο ιονίζουσες), σταματούν σε φύλλο αλουμινίου πάχους λίγων χιλιοστών ή σε μαλακό ιστό λίγων εκατοστών.

Ακτίνες νετρονίων: Παρότι δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, είναι ιονίζουσα ακτινοβολία (προκαλεί ιόντα στο μέσο που διασχίζει). Πρόκειται επίσης για επικίνδυνη για τον άνθρωπο ακτινοβολία, αν και απορροφάται από ελαφρά υλικά (κυρίως υδρογονούχα).

### 3.4.3 Ακτινοβολία - $\gamma$

Εξ ορισμού, πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ραδιενεργά υλικά. Ακολουθεί συνήθως την εκπομπή ακτίνων  $\alpha$  ή  $\beta$  και έχει υψηλή διεισδυτική ικανότητα (ανάλογη με τις ακτίνες -X υψηλών και πολύ υψηλών kV) και υψηλή δράση ιονισμού στο μέσο που διαδίδεται. Η ενέργεια της ακτινοβολίας - $\gamma$  (όπως και των ακτίνων υψηλών κιλοβόλτ) δίνεται σε eV. 500 keV ακτίνες - $\gamma$  (ή -X) έχουν περίπου την ίδια διεισδυτική ικανότητα ακτίνων -X τάσεως 500 kV.

### 3.4.4 Βιομηχανικά ισότοπα ακτίνων - $\gamma$

Αν και αρχικά χρησιμοποιήθηκαν φυσικά ραδιενεργά υλικά, σήμερα χρησιμοποιούνται τεχνητά ασταθή ισότοπα, παραγόμενα με μία εκ των δύο κατωτέρω μεθόδων.

α) Με βομβαρδισμό βαρέων πυρήνων φυσικών υλικών με νετρόνια, μέσα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Το ραδιενεργό ισότοπο  $^{27}\text{Co}60$  παράγεται από το φυσικό μη ραδιενεργό  $^{27}\text{Co}59$ . (περίπου μετά ένα χρόνο συνεχούς βομβαρδισμού) και το  $\text{Ir}192$  από το επίσης φυσικό και μη ραδιενεργό  $\text{Ir}191$  (σε λίγους μήνες).

β) Με διάσπαση ραδιενεργών υλικών. Το  $\text{Cs}137$  και το  $\text{Tm}170$  παράγονται από τη διάσπαση  $\text{U}235$ .

Τα ραδιενεργά υλικά κατασκευάζονται σε σφαιρίδια (pellets) συνήθως κυλινδρικής μορφής με μήκος ίσο προς τη διάμετρο (συχνότατα 2x2 και 4x4 mm).

### 3.4.5 Το Ιρίδιο 192

Το  $\text{Ir}192$  εκπέμπει 12 χαρακτηριστικές ακτινοβολίες (12 διαφορετικά μήκη κύματος) ενέργειας 0.137 ως 0.651 MeV (Μεγαηλεκτρονιοβόλτ) και άρα αντιστοιχεί σε διεισδυτική ικανότητα με ακτίνες -X 500 έως 600 kV. Εκτός από ακτινοβολία - $\gamma$ , εκπέμπει και  $\beta$ . Έχει ημιπερίοδο ζωής 74.3 ημέρες (πρακτικά 75) και πάχος υποδιπλασιασμού 4.8 mm μολύβδου και 48 mm σκυροδέματος (μπετόν).

Ο ρυθμός δόσης στο 1 μέτρο απόστασης από την πηγή είναι 0.55R/Ci/H. (Roentgens ανά Curie ανά ώρα). Συνιστάται για ραδιογράφιση χάλυβα πάχους 1/4 ως 3 1/2 ίντσες, αν και πολλές προδιαγραφές απαγορεύουν τη χρήση του για χάλυβα πάχους μικρότερου από 3/4" (19mm), λόγω κακής αντίθεσης της εικόνας.

Έχει πολύ υψηλή ειδική ενεργότητα (Ci/gr) και συνήθως παράγεται με αρχική ενεργότητα πηγής 50 Ci (στην Ελλάδα φθάνει έχοντας «πέσει» στα 40 Ci ή λιγότερο).

### 3.4.6 Το Κοβάλτιο 60

Το Co60 εκπέμπει 2 χαρακτηριστικές ακτινοβολίες ενέργειας 1.17 και 1.33 MeV (που αντιστοιχούν σε διεισδυτική ικανότητα αντίστοιχη με ακτίνες -X 2000 kV περίπου).

Η ημιπερίοδος ζωής του είναι μεγάλη (5.3 χρόνια) και το πάχος υποδιπλασιασμού του είναι 12.45 mm μολύβδου και 66 mm σκυροδέματος (μπετόν).

Ο ρυθμός δόσης στο 1m είναι 1.35 R/Ci/H (Roentgens ανά Curie ανά ώρα).

Συνιστάται για ραδιογράφιση χάλυβα πάχους 2"ως 8" και πολλές προδιαγραφές απαγορεύουν τη χρήση του για πάχη μικρότερα από 1.5" (38mm), λόγω κακής αντίθεσης της ραδιογραφικής εικόνας.

Στην Ελλάδα δεν επιτρέπεται η χρήση του από ιδιώτες, για συνήθεις βιομηχανικές ραδιογραφικές εφαρμογές.

### 3.4.7 Ενεργότητα πηγής -γ

Ως ενεργότητα πηγής -γ (activity) ορίζεται ο αριθμός διασπάσεων του ραδιενεργού υλικού στην μονάδα του χρόνου. Η παλιά μονάδα ήταν το Curie (Ci), που αντιστοιχεί σε 37 δισεκατομμύρια ( $37 \times 10^9$ ) διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο.

Η μονάδα του Διεθνούς Συστήματος (S.I) είναι το Becquerel (Bq) που αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο.

### 3.4.8 Ειδική ενεργότητα πηγής -γ

Είναι η ενεργότητα της πηγής ανά μονάδα μάζας του ραδιενεργού υλικού και εκφράζεται συνήθως σε Ci/gr (Curie ανά γραμμάριο).

Μειώνεται με το χρόνο με το ίδιο τρόπο που μειώνεται η ενεργότητα (Ci) της πηγής (διότι η μάζα του υλικού παραμένει πρακτικά σταθερή).

Από τα συνήθη ισότοπα, το Irl92 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ειδική ενεργότητα.

### 3.4.9 Χρόνος υποδιπλασιασμού

Το ραδιενεργό υλικό διασπάται στο χρόνο με εκθετικό ρυθμό και ισχύει η μαθηματική έκφραση:

$$N_t = N_0 \exp(-\lambda t) \text{ είτε } N_t = N_0 x e^{-\lambda t}, \quad (3.4)$$

όπου  $N_t$  η ενεργότητα της πηγής μετά την παρέλευση χρόνου  $t$  (από τη στιγμή της αρχικής ενεργότητας  $N_0$ ) και  $\lambda$  η σταθερά διάσπασης.

Επειδή ο νόμος είναι εκθετικός, σε κάθε σταθερό χρονικό διάστημα ο λόγος τελικής προς αρχική ενεργότητα είναι επίσης σταθερός. Έτσι, προκειμένου να έχουμε υποδιπλασιασμό της ενεργότητας (κάθε φορά) απαιτείται χρονικό διάστημα ίσο με  $T=0.693 / \lambda$  (όπου 0.693 ο φυσικός λογάριθμος του 2).

Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος υποδιπλασιασμού είτε ημιπερίοδος ζωής (Half Life) και είναι ίσος με 74 περίπου ημέρες για το Ir192, 5.3 χρόνια για το Co60 και 30.1 χρόνια για το Cs137.

Ο νόμος της διάσπασης στο χρόνο μπορεί να γραφεί και ως:

$$N_0 / N_t = 2^{t/T} \quad (3.5)$$

όπου  $T$  η ημιπερίοδος ζωής του ισότοπου.

#### 3.4.10 Πάχος υποδιπλασιασμού (- $\gamma$ και - $X$ )

Το πάχος υποδιπλασιασμού (πάχος ημίσειας τιμής. Half Value Layer) αντιστοιχεί στο πάχος ενός υλικού που χρειάζεται για να απορροφηθεί η μισή από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Είναι σταθερό για κάθε μήκος κύματος και για κάθε υλικό, καθώς ο νόμος της απορρόφησης της ακτινοβολίας - $X$  και - $\gamma$  από την ύλη είναι εκθετικός.

Ο νόμος της απορρόφησης, εκτός από τη γνωστή έκφραση  $I_t = I_0 \times \exp(-\mu t)$ , όπου  $\mu$  ο συντελεστής γραμμικής απορρόφησης και  $t$  το πάχος του υλικού, μπορεί να γραφεί και ως

$$I_0 / I_t = 2^{t/HVL} \quad (3.6)$$

όπου HVL το πάχος ημίσειας τιμής του υλικού.

Για το Ir-192 το πάχος ημίσειας τιμής είναι 4.82 mm μολύβδου ή 48.2 mm σκυροδέματος και για το Co60 αντίστοιχα 12.45 mm και 66 mm.

Προκειμένου για ακτίνες - $X$ , τα πάχη υποδιπλασιασμού μολύβδου και σκυροδέματος έχουν ως κατωτέρω:

100kV: 0.24 mm και 18 mm αντίστοιχα

200kV: 0.5 mm και 25.4 mm

250kV: 0.8 mm και 28 mm

300 kV: 1.5 mm και 30.5 mm

400kV: 2.2 mm και 33 mm Το πάχος ενός υλικού που απορροφά το ένα δέκατο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, καλείται «πάχος τιμής ενός δεκάτου».

### 3.4.11 Πηγές ισοτόπων

Τα σφαιρίδια (pellet) ισοτόπου τοποθετούνται από τον προμηθευτή του ισοτόπου σε μία στεγανή κάψουλα, συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα. Η κάψουλα δεν παρέχει προστασία από ακτινοβολία και προκειμένου να μεταφερθεί, πρέπει να τοποθετείται μέσα σε άλλο υλικό ή δοχείο. Η κάψουλα με το σφαιρίδιο ισοτόπου ονομάζεται "πηγή" (source).

### 3.4.12 Συσσκευές ακτίνων - $\gamma$

Οι συσκευές ακτίνων - $\gamma$  (κάμερες) πρέπει αφενός να παρέχουν ασφάλεια, εφόσον δεν χρησιμοποιούνται για ραδιογράφιση, και αφετέρου να επιτρέπουν τον χειρισμό από αρκετή απόσταση.

Οι συσκευές παρέχουν ασφάλεια μέσω θωράκισης με υλικό υψηλής απορρόφησης, (μόλυβδο, κράμα βολφραμίου ή συνηθέστερα αδρανές ουράνιο - depleted uranium, δηλαδή ουράνιο από το οποίο έχει αφαιρεθεί σχεδόν όλο το ραδιενεργό U235 και έχει μείνει σχεδόν καθαρό U238). Το αδρανές ουράνιο είναι ελαφρά ραδιενεργό και επομένως η συσκευή εκπέμπει μια χαμηλή δόση ακτινοβολίας, ακόμη και όταν δεν περιέχει πηγή ισοτόπου. Όταν περιέχεται ισότοπο στη συσκευή, ενδέχεται να επιτρέπεται ρυθμός δόσεως έως 200mR/h πάνω σ' αυτήν είτε 10mR/h σε απόσταση 1m.

Υπάρχουν 4 βασικοί τύποι κάμερας ισοτόπων, ανάλογα με το πώς επιτυγχάνεται η αποκάλυψη της πηγής, ώστε να επιτραπεί η ραδιογράφιση.

α) Συσσκευές από τις οποίες απομακρύνεται ένα μέρος της θωράκισης (μπροστά από την πηγή). Η πηγή μπορεί επίσης να βγει τελείως από τη θωράκιση, ώστε να υπάρχει πανοραμική λήψη.

β) Συσσκευές όπου ένα μέρος της θωράκισης (που περιέχει και την πηγή) απομακρύνεται από υπόλοιπη θωράκιση και μεταφέρεται στο ακριβές σημείο έκθεσης.

γ) Συσκευές που περιλαμβάνουν ένα άνοιγμα στην εξωτερική θωράκιση. Η πηγή είναι προσαρμοσμένη σε ένα κύλινδρο από υλικό θωράκισης που μπορεί να περιστραφεί, φέροντας την πηγή στην θέση του ανοίγματος.

δ) Οι πλέον χρησιμοποιούμενες κάμερες είναι αυτές με εύκαμπτο καλώδιο προέκτασης, του οποίου το ένα άκρο είναι συνδεδεμένο με την πηγή και το άλλο τυλίσσεται σε ειδικό "καρούλι".

Εκτυλίσσοντας το καλώδιο, απομακρύνεται η πηγή από τη θωρακισμένη συσκευή και οδηγείται στο άκρο ενός σωλήνα, που έχει ήδη τοποθετηθεί στο σημείο έκθεσης.

Τυλίσσοντας το καλώδιο, η πηγή επιστρέφει στη συσκευή. Εναλλακτικά, η απομάκρυνση και επιστροφή της πηγής από την συσκευή μπορεί να γίνει με πνευματικό ή ηλεκτρικό τρόπο.

Είναι απαραίτητο η συσκευή να περιλαμβάνει τουλάχιστον 3 φωτεινές σηματοδοτήσεις, μία ως ένδειξη ότι η πηγή βρίσκεται μέσα στην συσκευή, μία ότι βρίσκεται εκτός και μία ότι βρίσκεται στο άκρο του σωλήνα. Σύγχρονες συσκευές προσφέρουν απευθείας ανάγνωση της απόστασης της πηγής από την συσκευή.

### **3.4.13 Σύγκριση συσκευών -X και -γ**

Εφόσον το πάχος του υλικού βρίσκεται μέσα στο εύρος της ραδιογράφησης με την συγκεκριμένη συσκευή -X, η ραδιογραφία -X θα έχει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία (λόγω κυρίως μεγαλύτερης αντίθεσης) από την αντίστοιχη -γ. Αντίθετα, οι ακτίνες -γ (ακόμα και από Ir192) μπορούν να ραδιογραφήσουν πάχη μεγαλύτερα από ότι οι -X, έστω και αν χρειαστεί έκθεση αρκετών ωρών προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη πυκνότητα (αμαύρωση) του φιλμ. Οι ακτίνες -γ δεν μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά για ραδιογράφιση λεπτών δοκιμίων χάλυβα ή λεπτών και μεσαίου πάχους δοκιμίων από ελαφρά κράματα (π.χ. αλουμινίου και τιτανίου).

Οι συσκευές -γ είναι συνήθως πολύ ελαφρότερες από τις συσκευές -X (εκτός από ορισμένες σύγχρονες μικρές συσκευές -X), και δεν χρειάζονται πηγή ηλεκτρισμού για να ενεργοποιηθούν.

Άρα, λόγω μικρού βάρους και πλήρους αυτοδυναμίας είναι ιδανικές για εργοταξιακές χρήσεις.

Επίσης, αγορά μίας συσκευής -γ σημαίνει εν γένει μικρότερη δαπάνη από την αγορά μίας συσκευής -Χ.

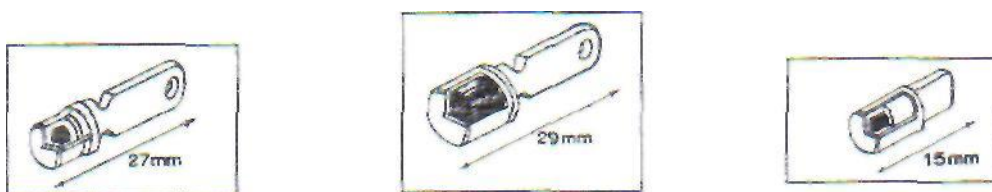
Όμως, εκτός από τη βασική διαφορά στην ποιότητα του ραδιογραφήματος, οι συσκευές -Χ παρέχουν και καλύτερο έλεγχο της ραδιογράφισης.

Ελέγχουμε τα kV της συσκευής, άρα το παραγόμενο μικρότερο μήκος κύματος και επομένως τη διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας, ενώ στις πηγές -γ τα προηγούμενα καθορίζονται από το είδος του ισοτόπου. Ελέγχουμε επίσης πολύ καλά την ένταση της ακτινοβολίας, ελέγχοντας τα mA της συσκευής, ενώ στη συσκευή -γ το αντίστοιχο μέγεθος (Curie του ισοτόπου) δεν μπορεί να ελεγχθεί, διότι εξαρτάται μόνο από το χρόνο.

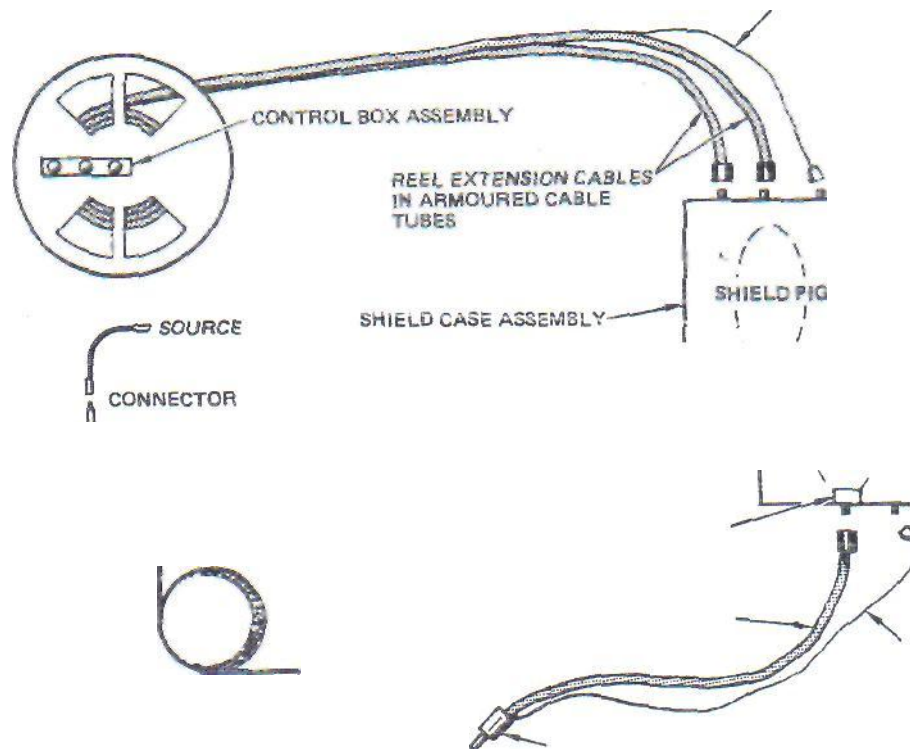
Στην περίπτωση της συσκευής -γ τα μόνα που μπορούν να ρυθμιστούν είναι η απόσταση πηγής-φιλμ (συνήθως μικρότερη από ότι στην περίπτωση της -Χ) και ο χρόνος έκθεσης (συνήθως πολύ μεγαλύτερος από ότι στις -Χ).

Ένα ακόμη μειονέκτημα των συσκευών -γ είναι η ανάγκη συνεχούς αλλαγής της πηγής, ειδικά στο Ir 192, που ο χρόνος ημίσειας ζωής είναι πολύ μικρός.

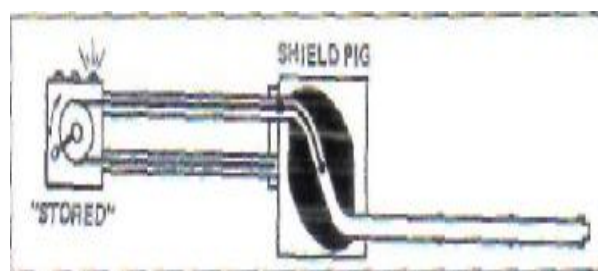
Παρόλη την εκτεταμένη χρήση των ακτινών -γ, ιδίως σε εργοταξιακές εφαρμογές, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι απαιτήσεις μας για την ποιότητα του ραδιογραφήματος πρέπει να είναι μικρότερες σε σχέση με την αντίστοιχη ραδιογράφιση με ακτίνες -Χ. Είναι εξαιρετικά συνηθισμένο λάθος να δεχόμαστε ραδιογράφιση με -γ αλλά να ζητούμε ευαισθησία πενετραμέτρου και αντίθεση εικόνας σαν να ραδιογραφούμε με ακτίνες -Χ, προκαλώντας έτσι τριβές και δυσαρέσκειες με τον ραδιογράφο, χωρίς αυτός να φέρει ευθύνη.



**Εικόνα 3.5:** Πηγές ακτινών -γ (κάψουλες)



**Εικόνα 3.6:** Συσσκευή ισοτόπου



**Εικόνα 3.7:** Πηγή εντός της συσκευής



## 3.5 ΤΟ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΦΙΛΜ

### 3.5.1 Κατασκευή του φιλμ

Τα σύγχρονα ραδιογραφικά φιλμ αποτελούνται από μία λεπτή, εύκαμπτη και διαφανή πλαστική βάση, συνήθως μπλε απόχρωσης (κυρίως για αισθητικούς παρά για τεχνικούς λόγους). Η βάση επιστρώνεται με πολύ λεπτό στρώμα συγκολλητικής ουσίας, πάνω στην οποία τοποθετείται στρώμα αιωρήματος αλογονούχου (συνήθως βρωμιούχου) αργύρου σε ζελατίνη (το λεγόμενο γαλάκτωμα - emulsion). Επιστρώνεται γαλάκτωμα και στις δύο πλευρές της βάσης, προκειμένου να επιτυγχάνονται μικρότεροι χρόνοι έκθεσης για την ίδια αμαύρωση (πυκνότητα) του φιλμ.

Τέλος, τοποθετείται ένα λεπτό προστατευτικό επίστρωμα ζελατίνης και στις δύο πλευρές του φιλμ. Το πάχος της πλαστικής βάσεως είναι συνήθως 0.007" ενώ το συνολικό πάχος επιστρώσεων σε κάθε πλευρά (συγκολλητική ουσία, γαλάκτωμα και προστατευτικό στρώμα ζελατίνης) δεν υπερβαίνει το 0.001".

Όταν το γαλάκτωμα εκτεθεί σε ακτίνες -Χ και -γ είτε φως, συμβαίνει μία αλλαγή στους κρυστάλλους και σχηματίζεται η λεγόμενη "λανθάνουσα εικόνα" (latent image). Η λανθάνουσα εικόνα δεν μπορεί να ανιχνευθεί με την όραση ούτε με καμία άλλη συνήθη φυσική μέθοδο.

Όταν το φιλμ τοποθετηθεί σε λουτρό εμφάνισης, μέσω χημικής αλλαγής οι εκτεθειμένοι κρύσταλλοι βρωμιούχου αργύρου διασπώνται και δίνουν μαύρο μεταλλικό άργυρο, ο οποίος σχηματίζει την εικόνα πάνω στο φιλμ - ραδιογράφημα.

Τα ραδιογραφικά φιλμ διαφέρουν αρκετά από τα φωτογραφικά φιλμ, παρότι οι φυσικές αρχές είναι ακριβώς οι ίδιες.

### 3.5.2 Πυκνότητα του φιλμ

Ως πυκνότητα (Density - D) ραδιογραφικού φιλμ ονομάζεται ο δεκαδικός λογάριθμος του λόγου προσπίπτοντος ορατού φωτός προς το εξερχόμενο ορατό φως, όταν το (εμφανισμένο) φιλμ τοποθετηθεί μπροστά από μία πηγή φωτός, όπως π.χ. είναι η οθόνη ραδιογραφημάτων (viewer).

$$D = \log(I_0/I_1) \quad (3.7)$$

όπου  $I_0$  η ένταση του φωτός που προσπίπτει στο φιλμ και  $I_1$  η ένταση του φωτός που εξέρχεται από το φιλμ.

Η πυκνότητα ενός φιλμ είναι παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα του ραδιογραφήματος. Για τις ίδιες συνθήκες ραδιογράφησης, μεγαλύτερη πυκνότητα σημαίνει και μεγαλύτερη ευαισθησία (καλύτερη ποιότητα). Γι' αυτό το λόγο όλες οι σχετικές προδιαγραφές ορίζουν κατώτερο αποδεκτό όριο πυκνότητας ραδιογραφήματος (συνήθως 1.8 για ραδιογραφήσεις συγκολλήσεων με ακτίνες -X και 2.0 για ραδιογραφήσεις συγκολλήσεων με ακτίνες -γ).

Το ανώτερο όριο πυκνότητας καθορίζεται επίσης από τις προδιαγραφές (συνήθως 4.0) αλλά έχει κυρίως να κάνει με τα χαρακτηριστικά της οθόνης ραδιογραφημάτων (viewer). Πυκνότητα φιλμ ίση με 3.0 σημαίνει ένταση προσπίπτοντος φωτός κατά χίλιες φορές πολλαπλάσια της ελάχιστης έντασης που μπορεί να δει τον ανθρώπινο μάτι, κατά συνέπεια υπάρχουν δύο προβλήματα: α) Παραγωγή εξαιρετικά έντονου αλλά ομοιόμορφου φωτός β) Απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας, ώστε να μη βλαφτεί το φιλμ (αλλά και το ηλεκτρικό κύκλωμα της οθόνης).

Εάν λάβουμε υπόψη μας τη σχετική σύσταση για λαμπρότητα φωτισμένου φιλμ ίση με  $30 \text{ cd/m}^2$ , φιλμ πυκνότητας 3.0 απαιτεί λαμπρότητα οθόνης  $30.000 \text{ cd/m}^2$ .

### 3.5.3 Παρατήρηση του φιλμ

Η παρατήρηση του ραδιογραφικού φιλμ γίνεται μέσα σε σκοτεινό θάλαμο. Για λόγους ασφαλείας (αλλά και ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, όπως έχει δείξει εμπειρία), συνιστάται ένας διάχυτος λευκός φωτισμός χαμηλής έντασης (της τάξεως του εξερχόμενου από τη ραδιογραφία φωτός, ή μικρότερης).

Πριν από την παρατήρηση του φιλμ πρέπει να προηγηθεί χρόνος προσαρμογής των ματιών μας (συνήθως ως 5-10 min) και βέβαια να αποφεύγεται η απευθείας όραση (έστω και μέρους) της ακάλυπτης από το ραδιογράφημα οθόνης (ειδίλλως χρειάζεται πάλι χρόνος προσαρμογής και εξάλλου επέρχεται κόπωση των ματιών).

Απαιτείται καλή όραση από τον παρατηρητή και πάντως είναι γεγονός ότι διαφορετικοί άνθρωποι (της ίδιας εμπειρίας), βλέπουν τις λεπτομέρειες σε διαφορετικό βαθμό.

Είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό να χρησιμοποιούμε μεγεθυντικό φακό (x4 ως x8) για την παρατήρηση των λεπτομερειών. Είναι επίσης καλή τεχνική ή ελαφρά μετακίνηση του φιλμ (δεξιά -αριστερά είτε κοντά - μακριά), όταν παρατηρούμε κάποια λεπτομέρεια.

### 3.5.4 Μέτρηση της πυκνότητας

Η πυκνότητα μετράται με ειδικά όργανα (πυκνόμετρο/ντενσιτόμετρα, densitometer), αναλογικά ή ψηφιακά. Τα πλέον σύγχρονα είναι τύπου μολυβιού (pencil type). Το πυκνόμετρο πρέπει να ελέγχεται τακτικά, με σύγκριση πιστοποιημένου φιλμ κλιμακωτού σφήνα (certificated step-wedge density strip) και να βαθμονομείται κανονικά όποτε παρουσιάζει σημαντική απόκλιση (συνήθως  $\pm 10\%$ ) και πάντως τουλάχιστον μία φορά κάθε 12 μήνες, από εξουσιοδοτημένο άτομο ή εταιρία.

Η μέτρηση της πυκνότητας μπορεί επίσης να γίνει έμμεσα με σύγκριση πυκνοτήτων, χρησιμοποιώντας φιλμ κλιμακωτού σφήνα.

### 3.5.5 Χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ

Για κάθε συγκεκριμένο τύπο (και κατασκευαστή) ραδιογραφικού φιλμ, υπάρχει και μία καμπύλη που συνδέει την έκθεση ( $mAx_{min}$  είτε  $C_{ix}_{min}$ ) με την πυκνότητα που επιτυγχάνεται με συγκεκριμένες συνθήκες εμφάνισης του φιλμ.

Ο κάθετος άξονας (τεταγμένη) απεικονίζει την πυκνότητα  $D$  και ο οριζόντιος (τετμημένη) τον δεκαδικό λογάριθμο της σχετικής έκθεσης ( $\log \text{rel exposure}$ ). Χρησιμοποιούμε τη σχετική και όχι την απόλυτη έκθεση για να έχουμε την ίδια καμπύλη, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα πρώτον διότι είναι πιο "πυκνή" από την απλή αριθμητική και δεύτερον λόγω της βασικής ιδιότητας της λογαριθμικής κλίμακας: Σταθερή απόσταση μεταξύ σημείων της λογαριθμικής γραμμής σημαίνει σταθερό λόγο πραγματικών τιμών. Επομένως, αν διπλασιάσουμε την απόσταση  $X_1X_2$  της λογαριθμικής γραμμής και ορίσουμε έτσι το σημείο  $X_3$ , ο λόγος  $10^{x_3}/10^{x_2}$  είναι ίσος με το λόγο  $10^{x_2}/10^{x_1}$ . Αντίστροφα, το μέσον  $X_2$  μιας αποστάσεως  $X_1X_3$  ορίζει το γεωμετρικό μέσο των τιμών  $10^{x_1}$  και  $10^{x_3}$  ( $\sqrt{10^{x_1} \times 10^{x_3}}$ ).

Η χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ (είτε καμπύλη  $H$  και  $D$ , από τους Harter και Driffield που μελέτησαν το φωτογραφικό φιλμ το 1890) δίνει πολύ βασικές πληροφορίες για το ίδιο το φιλμ.

α) Όσο πιο "απότομη" είναι η καμπύλη τόσο το φιλμ είναι υψηλότερης αντίθεσης, υπό τις ίδιες συνθήκες ραδιογράφησης.

Ως αντίθεση του φιλμ ορίζεται ο λόγος:

$$C = (D_1 - D_2)/\log(E_1 - E_2) \text{ είτε } C = (D_1 - D_2)/(X_2 - X_1) \quad (3.8)$$

όπου  $X_1$  και  $X_2$  οι τετμημένες (λογάριθμοι σχετικής έκθεσης) που αντιστοιχούν στις τεταγμένες (πυκνότητες)  $D_1$  και  $D_2$  αντίστοιχα.

Η αντίθεση δεν είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του φιλμ και μικραίνει δραματικά στον πόδα (κάτω άκρο) και στο άνω άκρο του φιλμ, γι' αυτό και οι περιοχές αυτές δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται.

β) Όσο πιο "αριστερά" βρίσκεται η χαρακτηριστική καμπύλη ενός φιλμ, τόσο το φιλμ είναι πιο "γρήγορο", δηλαδή μπορεί να δώσει συγκεκριμένη πυκνότητα με χρήση μικρότερης έκθεσης.

Η ταχύτητα ενός φιλμ έχει σχέση και με την αντίθεση του (συνήθως "γρήγορα" φιλμ έχουν και μικρότερη αντίθεση) αλλά και με την εγγενή δυσκρίνεια ή φαινόμενο κοκκώδες (γρήγορα φιλμ παρουσιάζουν μεγαλύτερο φαινόμενο κοκκώδες).

Η χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ (άρα και ταχύτητα, η αντίθεση αλλά και το κοκκώδες) εξαρτώνται επίσης από τις συνθήκες εμφάνισης (ιδιαίτερα το χρόνο τοποθέτησης στο λουτρό εμφάνισης) και τη χρήση ενισχυτικών πλακών (οι οποίες εν γένει αυξάνουν την πυκνότητα, άρα και την ταχύτητα του φιλμ αλλά και χαλούν την ευκρίνεια: οι μεν μεταλλικές ανεπαίσθητα ενώ οι φθορίζουσες δραστηκότετα).

Αν έχουμε επιτύχει ραδιογραφική εικόνα αλλά η πυκνότητα της δεν είναι ικανοποιητική, μπορούμε να πάρουμε εικόνα με την επιθυμητή πυκνότητα, χωρίς να αλλάξουμε κανένα άλλο παράγοντα της ραδιογράφησης (kV, ενισχυτικές πλάκες, συνθήκες γεωμετρίας, συνθήκες εμφάνισης κλπ), χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$E_1/E_2 = 10^{x_2-x_1} \quad (3.9)$$

όπου  $X_1$  η τετμημένη που αντιστοιχεί σε τεταγμένη (πυκνότητα)  $D_1$ ,  $E_1$  η χρησιμοποιηθείσα έκθεση,  $X_2$  ή τετμημένη που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα  $D_2$  και  $E_2$  η έκθεση που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε.

Αύξηση του χρόνου (ή θερμοκρασίας) εμφάνισης, συνεπάγεται μετακίνηση της χαρακτηριστικής καμπύλης (βλέπε σχ. 3.2) προς τα αριστερά (ταχύτερο φιλμ) και ταυτόχρονα πιο απότομη καμπύλη (αύξηση της αντίθεσης).

### 3.5.6 Κατηγορίες φιλμ

Τα ραδιογραφικά φιλμ χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: Εκείνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με είτε χωρίς χρήση μεταλλικών ενισχυτικών πλακών

και εκείνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με ταυτόχρονη χρήση φθοριζουσών ενισχυτικών πλακών (screen είτε salt type).

Ανάλογα με τη σχετική "ταχύτητα", τα φιλμ μεταλλικών πλακών συνήθως χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

α) Πολύ αργά, πολύ λεπτόκοκκα.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει το Microtex της Kodak και το Structurix D<sub>2</sub> της Agfa Gevaert.

β) Αργά, λεπτόκοκκα.

Όπως το Crystalex της Kodak και τα Structurix D4 και D5 της Agfa Gevaert.

γ) Μεσαίας ταχύτητας, μεσαίου κοκκώδους.

Όντως το Industrex - type D της Kodak και το Structurix D7 της Agfa - Gevaert.

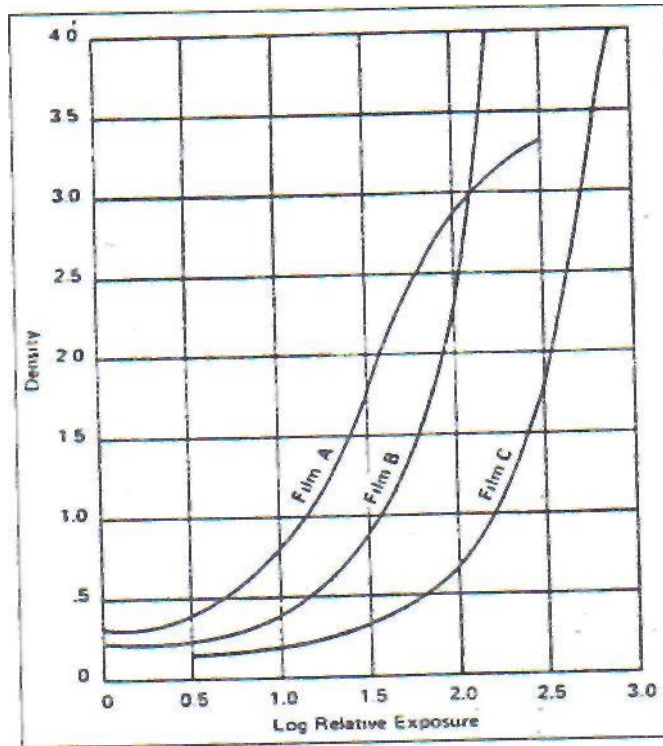
δ) Γρήγορα, χονδροκόκκα.

Όπως το Kodirex της Kodak και το Structurix D10 της Agfa Gevaert.

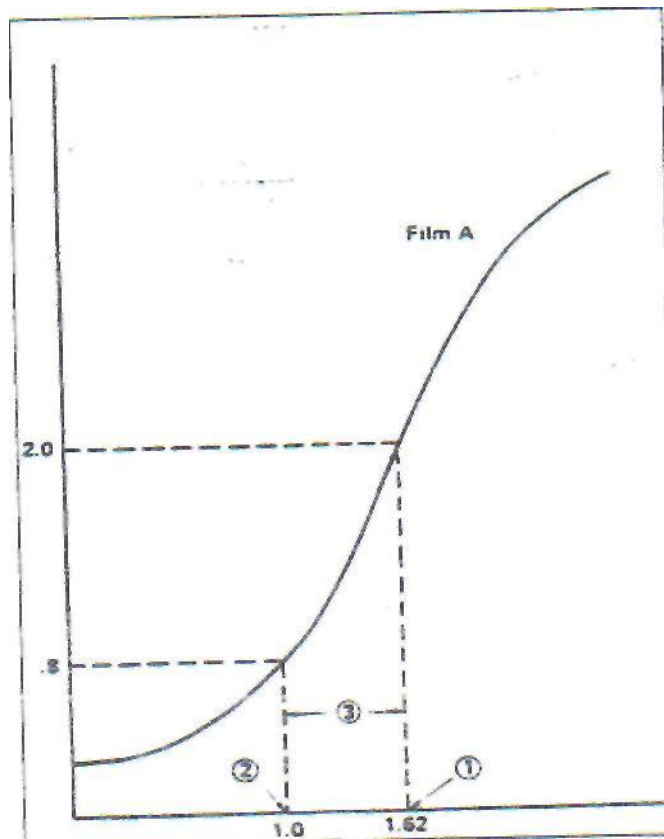
Ενδέχεται οι κατασκευάστριες εταιρείες να κατασκευάζουν περισσότερους τύπους φιλμ, προσφέροντας μεγαλύτερη ποικιλία αλλά και καταλληλότητα, για συγκεκριμένες χρήσεις.

Φιλμ για χρήση με φθορίζουσες ενισχυτικές πλάκες είναι π.χ. το Industrex - type S της Kodak και το Structurix RCF της Agfa Gevaert.

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN5841 καθορίζει την ταξινόμηση των ραδιογραφικών φιλμ σε διάφορες κλάσεις, ενώ το EN25580 (ISO 5580:1985) παραθέτει τις ελάχιστες απαιτήσεις για τις οθόνες των φιλμ (viewer, illuminator).



Σχήμα 3.1 : Χαρακτηριστικές καμπύλες φιλμ διαφορετικών ταχυτήτων



Αξιοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ:  $E_2/E_1 = 10^{x_2-x_1} = 10^{0.62} = 4.2$

Άρα, για να επιτύχουμε πυκνότητα 2.0 D, απαιτείται έκθεση 4.2 φορές μεγαλύτερη από εκείνη που επιτυγχάνει πυκνότητα 0.8 B

### **3.6 ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΗΣΗΣ**

#### **3.6.1 Αντίθεση ραδιογραφικής εικόνας**

Ως αντίθεση ραδιογραφικής εικόνας ονομάζεται η διαφορά πυκνοτήτων του φιλμ, σε γειτονικές περιοχές του ραδιογραφήματος.

Η αντίθεση (contrast) είναι ένας εκ των δύο βασικών παραγόντων ποιότητας της ραδιογραφικής εικόνας (ο άλλος είναι η ευκρίνεια). Αύξηση της αντίθεσης, με οποιονδήποτε τρόπο, σημαίνει βελτίωση της ποιότητας/ευαισθησίας της ραδιογραφικής εικόνας.

Η συνολική αυτή αντίθεση διακρίνεται σε αντίθεση αντικειμένου και σε αντίθεση φιλμ.

Η «αντικειμενική» αυτή αντίθεση (διαφορά πυκνοτήτων) είναι μετρήσιμη (με πυκνόμετρο/ντενσιτόμετρο) ενώ η υποκειμενική αντίθεση (οπτική εντύπωση της αντικειμενικής αντίθεσης) εξαρτάται από τον άνθρωπο-παρατηρητή και τις συνθήκες παρατήρησης.

#### **3.6.2 Εύρος ραδιογραφικής εικόνας**

Ορίζεται ως το εύρος παχών αντικειμένου που μπορούν να ραδιογραφηθούν (με μία λήψη) μέσα στο αποδεκτό εύρος πυκνοτήτων (π.χ. από 1.8 ως 4.0). Άρα, εξ ορισμού, είναι το αντίστροφο της αντίθεσης και αύξηση της αντίθεσης σημαίνει ελάττωση του εύρους (και το αντίστροφο).

Το εύρος μπορεί να αυξηθεί είτε μέσω ελάττωσης της αντίθεσης (π.χ. με χρήση "σκληρότερης" ακτινοβολίας, δηλαδή μεγαλύτερης συχνότητας-μικρότερου μήκους κύματος) είτε με χρήση φίλτρων (που πρακτικά "σκληραίνουν" την ακτινοβολία και ελαττώνουν την αντίθεση) είτε με τοποθέτηση διπλού φιλμ (διαφορετικών ταχυτήτων) μέσα στην ίδια κασέτα. Το ταχύτερο φιλμ θα αποτυπώσει (σε αποδεκτές πυκνότητες) τα μεγαλύτερα πάχη και το αργότερο τα μικρότερα.

### 3.6.3 Ευκρίνεια ραδιογραφικής εικόνας

Ως ραδιογραφική ευκρίνεια (definition, sharpness) ορίζεται η απότομη μετάβαση από περιοχή μιας πυκνότητας σε περιοχή διαφορετικής πυκνότητας, είτε η ευκρίνεια των ορίων μιας περιοχής συγκεκριμένης πυκνότητας σε σχέση με διπλανές άλλης πυκνότητας. Είναι ένας εκ των δύο βασικών παραγόντων ποιότητας / ευαισθησίας της ραδιογραφικής εικόνας και αποδίδεται σε παράγοντες γεωμετρικής δυσκρίνειας (αντίστροφο της ευκρίνειας) που εξαρτάται από τη γεωμετρία της λήψης και σε παράγοντες εγγενούς (inherent) δυσκρίνειας που εξαρτώνται από το φιλμ, την ακτινοβολία και τη χρήση ενισχυτικών πλακών.

### 3.6.4 Έκθεση - Νόμος αντιστοιχίας - Συντελεστής Έκθεσης

Ως ραδιογραφική έκθεση ορίζεται το γινόμενο mA x χρόνο έκθεσης (ραδιογραφία - X) είτε Ci x χρόνο έκθεσης (ραδιογραφία -γ).

Για το ίδιο ραδιογραφικό αποτέλεσμα (αντίθεση, ευκρίνεια, πυκνότητα) και υπό σταθερές όλες τις άλλες συνθήκες ραδιογράφησης (γεωμετρία, ενισχυτικές πλάκες, kV ή είδος ισοτόπου, συνθήκες και χρόνους εμφάνισης κλπ), το γινόμενο πρέπει να παραμένει σταθερό (νόμος της αντιστοιχίας, reciprocity law):

$$E_1 = E_2, \text{ άρα } mA_1 \times \text{min}_2 = mA_2 \times \text{min}_1 \quad (3.10)$$

Εάν αλλάζει η απόσταση πηγής-φιλμ ο νόμος γίνεται:

$$E_1 / D_1^2 = E_2 / D_2^2 \quad (3.11)$$

Το μέγεθος  $E_1 / D_1^2$  ορίζεται σαν **συντελεστής έκθεσης** (exposure factor). Ο νόμος δεν ισχύει όταν χρησιμοποιούνται φθορίζουσες ενισχυτικές πλάκες, όπως δεν ισχύει και στα συστήματα φθοροσκοπίας.

### 3.6.5 Γεωμετρική δυσκρίνεια

Επειδή η πηγή ακτινών -X είτε -γ δεν είναι σημειακή (έχει διαστάσεις), ούτε είναι τοποθετημένη στο άπειρο αλλά σε κοντινή σχετικά απόσταση με το δοκίμιο και το φιλμ, έχουμε το σχηματισμό παρασκιάς (penumbra) γύρω από την σκιά (umbra). Η παρασκιά ονομάζεται και γεωμετρική δυσκρίνεια (geometric unsharpness), συμβολίζεται ως  $U_g$  και αποτελεί παράγοντα που χαλά την ευκρίνεια της εικόνας (άρα και την ποιότητα).

Το μέγεθος της γεωμετρικής δυσκρίνειας δίνεται από τον τύπο:



$$U_g = F \times t/d \quad (3.12)$$

όπου  $F$  η διάσταση του εστιακού σημείου (προβαλλόμενη διάσταση της πηγής),  $t$  η απόσταση αντικειμένου-φιλμ (OFD, object - film distance) και  $d$  η απόσταση πηγής-αντικειμένου (SOD, source - object distance).

Για τη βελτίωση της ευκρίνειας, πρέπει το φιλμ να τοποθετείται σε επαφή με το αντικείμενο (οπότε η διάσταση  $t$  γίνεται ίση με το πάχος του αντικειμένου), η απόσταση πηγής -αντικειμένου να είναι αρκετά μεγάλη και η διάσταση της πηγής να είναι μικρή.

Οι διάφορες προδιαγραφές δίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη  $U_g$ , ανάλογα με το πάχος του ραδιογραφούμενου υλικού (συνήθως για πάχη μικρότερα από 50mm προδιαγράφεται μέγιστη επιτρεπτή  $U_g$  ίση με 0.5mm).

Εξάλλου, για να αποφεύγεται παραμόρφωση (distortion) της εικόνας του αντικειμένου, πρέπει ο κεντρικός άξονας της ακτινοβολίας να είναι κατά το δυνατόν κάθετος προς το φιλμ, το φιλμ να είναι παράλληλο προς το επίπεδο του αντικειμένου και βεβαίως να μη μετακινείται η πηγή, το αντικείμενο ή το φιλμ, κατά την διάρκεια της ραδιογράφησης.

### 3.6.6 Μέτρηση του μεγέθους του εστιακού σημείου

Το μέγεθος του εστιακού σημείου (focal spot size) όπως αυτό προβάλλεται στο φιλμ, πρέπει να είναι γνωστό, διότι περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της γεωμετρικής δυσκρίνειας  $U_g$  και άρα παίζει ρόλο στην ελάχιστη αποδεκτή απόσταση πηγής-αντικειμένου. Προκειμένου για πηγές  $\gamma$  δεν αλλάζει με το χρόνο (εξάλλου η πηγή αντικαθίσταται συχνά), αλλά οι σχετικές προδιαγραφές απαιτούν τη μέτρηση του μεγέθους αυτού των συσκευών-Χ σε τακτά διαστήματα (παρότι αρχικά δίνεται από τον κατασκευαστή).

Η μέτρηση γίνεται με τη λεγόμενη κάμερα οπής καρφίτσας (pinhole camera) και ουσιαστικά λαμβάνουμε το ραδιογραφικό αποτύπωμα της πηγής πάνω σε ένα φιλμ, αφήνοντας την ακτινοβολία να περάσει μέσα από μία μικρή οπή ενός φύλλου μολύβδου που έχει τοποθετηθεί στη μέση της απόστασης πηγής - φιλμ.

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι σαν μέγεθος της πηγής παίρνουμε τη διαγώνιο (μέγιστη διάσταση) και όχι την μεγαλύτερη πλευρά.

Έτσι μία πηγή προβαλλόμενων διαστάσεων 2x2 έχει (προβαλλόμενο) μέγεθος 2.8 mm και όχι 2mm. Εξαιρέση αποτελούν οι απόλυτα κυκλικές πηγές, που

προβάλλονται σαν έλλειψη, και άρα το μέγεθος τους συμπίπτει με την πραγματική μέγιστη διάμετρο του εστιακού σημείου.

### 3.6.7 Ενυπάρχουσα / εγγενής δυσκρίνεια - κοκκώδες του φιλμ

Ως κοκκώδες ορίζεται η οπτική εντύπωση μη ομοιόμορφης πυκνότητας, πάνω στο ραδιογράφημα. Το κοκκώδες αυξάνεται όταν χρησιμοποιούμε φιλμ υψηλότερων ταχυτήτων είτε ακτινοβολία μεγαλύτερης συχνότητας (π.χ. - $\gamma$  είτε - $X$  υψηλότερων kV). Επίσης, αύξηση του χρόνου εμφάνισης μεγαλώνει το κοκκώδες (κάνει το φιλμ ταχύτερο αν και αυξάνει την πυκνότητα και έτσι βελτιώνει την αντίθεση). Η ενυπάρχουσα δυσκρίνεια εξαρτάται επίσης από τον τύπο του φιλμ και τα πιο αργά δίνουν μικρότερο κοκκώδες, σε αντίθεση με τα πιο γρήγορα, όπου το φαινόμενο είναι περισσότερο έντονο. Το κοκκώδες, παρότι σχετίζεται και με το πραγματικό μέγεθος του κρυστάλλου/κόκκου βρωμιούχου αργύρου του γαλακτώματος (που είναι πάρα πολύ μικρό), εξαρτάται κυρίως από το σχηματισμό συσσωμάτωσης των εκτεθειμένων κόκκων, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Ουσιαστικά, ένα προσπίπτον φωτόνιο - $X$  ή - $\gamma$  έχει αρκετή ενέργεια για να εκθέσει όχι μόνο έναν αλλά πολλούς κρυστάλλους γαλακτώματος, μέσω της εκπομπής ηλεκτρονίων από τους εκτιθέμενους κόκκους, σχηματίζοντας συσσωματώματα ή αλυσίδες εκτεθειμένων κόκκων.

Το κοκκώδες επιφέρει δυσκρίνεια στη ραδιογραφική εικόνα, η οποία ονομάζεται δυσκρίνεια του φιλμ ή ενυπάρχουσα /εγγενής (inherent) δυσκρίνεια και συμβολίζεται με  $U_f$ . Η  $U_f$  μετράται δύσκολα και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της δίνεται από τις διάφορες προδιαγραφές, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη ακτινοβολία.

### 3.6.8 Ο νόμος των αντιστρόφων τετραγώνων

Όταν ακτινοβολία σταθερής έντασης εκπέμπεται από πηγή μικρών σχετικά διαστάσεων, η εκπεμπόμενη δέσμη χάνει την ένταση της όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή, και μάλιστα ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από αυτήν. Αυτό συμβαίνει διότι η δέσμη ανοίγει στο χώρο και η συνολική της ενέργεια διασπείρεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια, (σε κάθε δεδομένη απόσταση από την πηγή, η ένταση ισούται με την ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας).

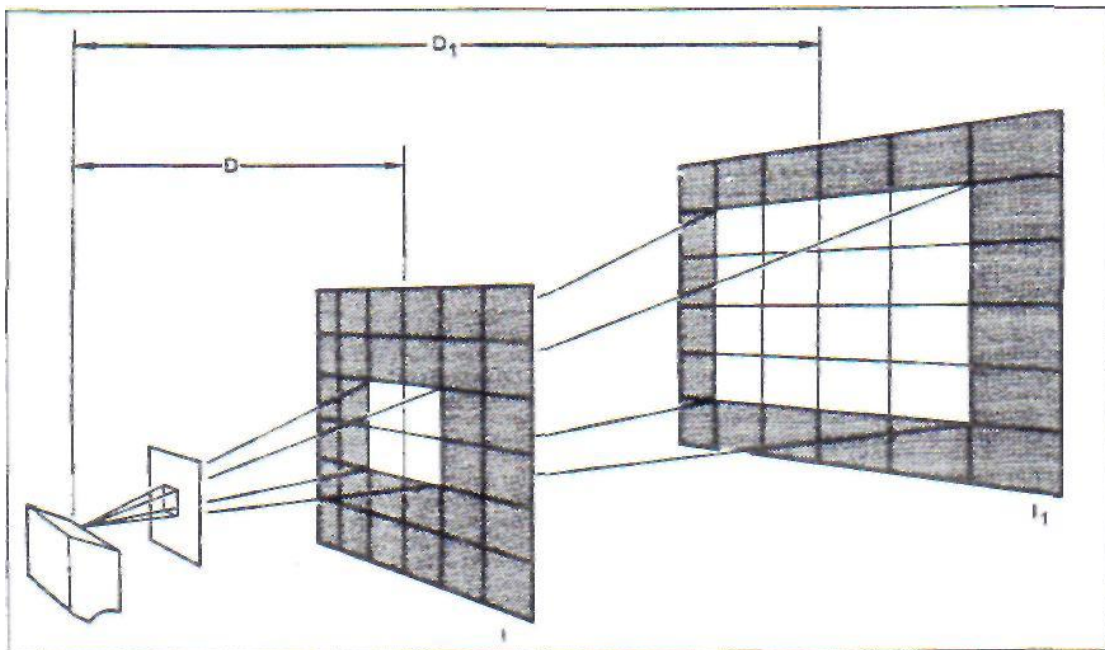
Ο νόμος αυτός της φυσικής ονομάζεται νόμος των αντίστροφων τετραγώνων και εκφράζεται με το τύπο:

$$I_1/I_2 = D_2^2/D_1^2 \quad (3.13)$$

όπου  $I_1$ ,  $I_2$  η ένταση της ακτινοβολίας σε απόσταση  $D_1$ ,  $D_2$  από την πηγή, αντίστοιχα.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε υπολογισμούς ασφαλείας.

Ο ρυθμός δόσης μιας πηγής  $\gamma$  (που δίνεται σαν  $R/Ci/h$  στο 1 μέτρο) ακολουθεί επίσης τον ανωτέρω νόμο, για αποστάσεις από την πηγή διαφορετικές του ενός μέτρου.



**Εικόνα 3.8:** Νόμος αντίστροφων τετραγώνων

### 3.7 ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ

#### 3.7.1 Χρησιμότητα

Κατά την πρόσπτωση των ακτίνων  $X$  και  $\gamma$  στο ραδιογραφικό φιλμ μόνο πολύ μικρό ποσοστό (της τάξης του 1%) της ενέργειας της ακτινοβολίας απορροφάται από το φιλμ, σχηματίζοντας τη λανθάνουσα εικόνα (latent image).

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας για την αύξηση της πυκνότητας της εικόνας (άρα ελάττωση της απαιτούμενης έκθεσης για να επιτύχουμε συγκεκριμένη πυκνότητα), χρησιμοποιούμε τις λεγόμενες "ενισχυτικές πλάκες" (intensifying screens).

**Διακρίνονται σε δύο βασικά είδη, στις μεταλλικές ενισχυτικές πλάκες ή ενισχυτικές πλάκες μολύβδου, και στις φθορίζουσες ενισχυτικές πλάκες ή πλάκες αλάτων (salt screens).**

Υπάρχει ακόμη ένας ενδιάμεσος τύπος, οι φθορομεταλλικές ενισχυτικές πλάκες.

### **3.7.2 Μεταλλικές ενισχυτικές πλάκες**

Πρόκειται συνήθως για λεπτά φύλλα μολύβδου πάχους 0.02 ως 0.2 mm, που τοποθετούνται εμπρός και πίσω από το φιλμ. Ο βασικός σκοπός τους είναι η ενίσχυση της ραδιογραφικής εικόνας, μέσω εκπομπής δευτερογενούς ακτινοβολίας -X αλλά κυρίως ηλεκτρονίων, που εκπέμπονται λόγω της σκέδασης της πρωτογενούς ακτινοβολίας στα φύλλα μολύβδου. Για ακτίνες -X 200 έως 400 kV, ένα ζεύγος πλακών μολύβδου μπορεί να ελαττώσει την απαιτούμενη έκθεση κατά 2 ως 5 φορές. Επιπρόσθετα όμως, το εμπρόσθιο φύλλο απορροφά τα μεγάλα μήκη κύματος της πρωτογενούς ακτινοβολίας, αλλά και της σκέδασης που παράγεται μέσα στο ραδιογραφούμενο δοκίμιο, βελτιώνοντας την εικόνα. Το οπίσθιο φύλλο (συνήθως μεγαλύτερου πάχους από το εμπρόσθιο), βοηθά επίσης στην αποδυνάμωση του φαινομένου της οπίσθιας σκέδασης.

Σαν υλικό των μεταλλικών ενισχυτικών πλακών συνήθως χρησιμοποιείται μόλυβδος (94% με 6% αντιμόνιο, για να μην είναι υπερβολικά μαλακός), λόγω της υψηλής απόδοσης του στην απορρόφηση ακτινοβολίας -X και -γ, την υψηλή εκπομπή ηλεκτρονίων αλλά και του χαμηλού κόστους και της μεγάλης λειτουργικότητας του σαν υλικό. Υλικά με καλύτερη απόδοση (π.χ. χρυσός, πλατίνα) χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Στην περίπτωση κασετών, συνήθως το εμπρόσθιο φύλλο μολύβδου έχει πάχος 0.125 mm και το οπίσθιο διπλάσιο (0.25 mm).

Η ενισχυτική πλάκα πρέπει να βρίσκεται σε άμεση και απόλυτη επαφή με το φιλμ, ειδάλλως υπάρχει σημαντική ελάττωση της ευκρίνειας. Ένα φύλλο χαρτιού ανάμεσα στο φιλμ και την πλάκα θα δώσει σαν ραδιογραφική εικόνα το "αποτύπωμα" της δομής του χαρτιού (μέσω σκέδασης της ακτινοβολίας στο φύλλο χαρτιού) και άρα δεν θα πρέπει ποτέ να τοποθετείται με αυτόν τον τρόπο.

Ενισχυτικές πλάκες μολύβδου χρησιμοποιούνται όχι μόνο στην περίπτωση ραδιογραφίας χαμηλών και μεσαίων kV, αλλά και στη ραδιογραφία υψηλών kV και -γ, αν και ο συντελεστής ενίσχυσης είναι τότε μικρότερος.

Στην περίπτωση χαμηλών kV (ενίστε κάτω από 100 και οπωσδήποτε κάτω από 50) συνιστάται η τοποθέτηση μόνο της οπίσθιας ενισχυτικής πλάκας, διότι ενδέχεται η απορρόφηση από την εμπρόσθια να είναι ισχυρότερη από την ενίσχυση που προκαλεί.

Οι ενισχυτικές πλάκες πρέπει να διατηρούνται καθαρές και ιδίως να μην έχουν γρατσουνίσματα (διότι αυτά θα φανούν στην ραδιογραφική εικόνα σαν μαύρες γραμμές, παρόμοιες με την εικόνα ρηγμάτων).

Οι ενισχυτικές πλάκες μολύβδου παρουσιάζουν "γήρανση", δηλαδή η επιφάνεια τους γίνεται λιγότερο στιλπνή, λόγω οξειδωσης, αλλά αυτό δεν φαίνεται να επηρεάζει την καταλληλότητα τους.

Εάν το φιλμ τοποθετείται με τις ενισχυτικές πλάκες σε κασέτα, δεν θα πρέπει να μείνουν για πολύ χρόνο πριν χρησιμοποιηθούν, διότι μπορεί να εμφανιστεί "ομίχλη" (fogging) στο ραδιογράφημα.

Υπάρχουν όμως και φιλμ ήδη τοποθετημένα σε φάκελο από σκληρό χαρτί (ready rack), συνήθως πλάτους 80mm και τυλιγμένα σε ρολό (που κόβεται στο απαραίτητο μήκος και σφραγίζεται στα άκρα, πάντα σε σκοτεινό θάλαμο) και τα οποία περιέχουν ενισχυτικές πλάκες οξειδίου του μολύβδου, που αντιστοιχούν σε πάχος 0.005"(0.125mm) φύλλου μολύβδου.

### 3.7.3 Φθορίζουσες ενισχυτικές πλάκες

Απορροφούν μέρος των ακτινών -X και -γ και εκπέμπουν δευτερεύουσα ακτινοβολία -X, ηλεκτρόνια, ορατό φως και υπεριώδη ακτινοβολία. Έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή ενίσχυσης αλλά προκαλούν εξαιρετικά μεγάλη ελάττωση της ευκρίνειας της ραδιογραφικής εικόνας, (γι' αυτό και δεν συνιστώνται στην περίπτωση -X υψηλών kV και στην περίπτωση -γ, εκτός αν είναι απόλυτα απαραίτητη η ελάττωση της έκθεσης). Όσο αυξάνεται η συχνότητα της ακτινοβολίας, τόσο παρουσιάζεται εντονότερο το φαινόμενο screen mottle (στίγματα από ενισχυτικές πλάκες), πάνω στη ραδιογραφική εικόνα.

Συνήθως κατασκευάζονται από σκληρό πετρευσμένο χαρτί ή πλαστικό, στο οποίο έχει τοποθετηθεί calcium tungstate είτε barium lead sulfate.

Απαιτείται και πάλι απόλυτη επαφή με το φιλμ αλλά και καθαρές/χωρίς γρατσουνιές πλάκες.

Καθαρίζονται με νερό και μη αρωματικό σαπούνι. Όπως και οι μεταλλικές πλάκες, έτσι και οι φθορίζουσες πρέπει να στεγνώσουν απόλυτα πριν χρησιμοποιηθούν. Χρησιμοποιούνται με φιλμ ειδικής κατηγορίας (screen film ή salt film), τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο εκπεμπόμενο ορατό φως.

Οι φθορίζουσες πλάκες δεν θα πρέπει να εκτίθενται απευθείας σε ακτινοβολία -X ή -γ (χωρίς να παρεμβάλλεται το ραδιογραφούμενο υλικό), διότι παρουσιάζεται ημιμόνιμη βλάβη (screen lag) είτε φθορισμός για λίγο χρόνο μετά από αυτή την έκθεση.

Χρησιμοποιούνται και αυτές σε ζεύγη, μία εμπρός και μία πίσω από το φιλμ. Η εταιρία Kodak κατασκευάζει φθορίζουσες ενισχυτικές πλάκες τριών "ταχυτήτων", οι οποίες για ραδιογραφία -X 150kV δίνουν ενίσχυση της εικόνας (ελάττωση της έκθεσης) κατά 900,450 και 225 φορές αντίστοιχα.

#### **3.7.4 Φθορομεταλλικές πλάκες**

Αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία και αποτελούνται από επίστρωση φθορίζοντος υλικού σε φύλλο μολύβδου. Χρησιμοποιούνται με κοινά φιλμ (και όχι ειδικά, για φθορίζουσες πλάκες). Δίνουν μεσαία ενίσχυση αλλά δεν ελαττώνουν τόσο σημαντικά την ευκρίνεια, όσο οι φθορίζουσες.

### **3.8 ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ**

#### **3.8.1 Φθοροσκοπία**

Κατά τη μέθοδο φθοροσκοπίας (fluoroscopy), ακτίνες -X ή -γ που διέρχονται από το ραδιογραφούμενο δοκίμιο προσπίπτουν όχι πάνω σε ραδιογραφικό φιλμ αλλά σε φθορίζουσα οθόνη. Ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας (άρα και αντίστροφα προς την απορρόφηση από το δοκίμιο) η οθόνη εκπέμπει ορατό φως. Έχουμε λοιπόν άμεση εικόνα του αντικειμένου αντίστροφης "αμαύρωσης" από την περίπτωση του φιλμ (λεπτές διατομές φαίνονται φωτεινές στην οθόνη, ενώ στο φιλμ θα ήταν σκοτεινές). Οι οθόνες φθοροσκοπίας κατασκευάζονται συνήθως με απόθεση στρώματος σουλφιδίων ψευδαργύρου και καδμίου (Zinc/Calcium sulfides) πάνω σε μία πλαστική βάση.

Η ευκρίνεια της εικόνας είναι πολύ μικρότερη από εκείνη ενός ραδιογραφικού φιλμ, αλλά υπάρχει το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης απεικόνισης του ραδιογραφήματος. Συνέπεια της αμεσότητας είναι η δυνατότητα ραδιογράφησης αντικειμένων ενόσω αυτά κινούνται π.χ. στη γραμμή παραγωγής του εργοστασίου.

Η φθοροσκοπία χρησιμοποιήθηκε από τον ίδιο τον C. Roentgen για τον έλεγχο των αποσκευών επιβατών σιδηροδρόμων, αμέσως μετά την ανακάλυψη των ακτίνων -Χ.

Η φθοροσκοπία λέγεται και ραδιογραφία πραγματικού χρόνου (real time radiography) αλλά και on line ραδιογραφία.

Ο παρατηρητής βρίσκεται πίσω από τη φθορίζουσα οθόνη και προστατεύεται από την εξερχόμενη ακτινοβολία (-Χ είτε -γ) είτε από προστατευτικό διαφανές γυαλί που περιέχει μόλυβδο είτε τοποθετούμενος πλάγια και παρατηρώντας την εικόνα όχι απευθείας αλλά μέσα από καθρέφτη.

Το εκπεμπόμενο από την φθορίζουσα οθόνη ορατό φως είναι κίτρινο-πράσινο, στο οποίο το ανθρώπινο μάτι έχει την μεγαλύτερη ευαισθησία.

Η εικόνα της φθοροσκοπίας μπορεί επίσης να αποτυπωθεί σε φωτογραφικό φιλμ.

### **3.8.2 Συστήματα ενίσχυσης της εικόνας**

Πρόκειται ουσιαστικά για σύγχρονες παραλλαγές της φθοροσκοπίας, που αποσκοπούν στην βελτίωση της ποιότητας μέσω κυρίως ενίσχυσης του σχετικά χαμηλού φωτός που εκπέμπει η οθόνη.

Τα φωτόνια που εκπέμπονται από τη φθορίζουσα οθόνη προσπίπτουν σε κατάλληλο "φωτοηλεκτρικό" σώμα, από όπου εκπέμπονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δίνουν ορατή εικόνα όταν προσπίπτουν σε άλλη κατάλληλη οθόνη (την τελική). Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται επίσης τεχνικές τηλεόρασης κλειστού κυκλώματος, οι οποίες είτε παραλαμβάνουν το φως της φθορίζουσας ή και της τελικής οθόνης είτε είναι απευθείας ευαίσθητες στην ακτινοβολία -Χ που εξέρχεται από το δοκίμιο (π.χ. μέσω CCD Charged-Coupled Discharge Device ή μέσω vidicon camera). Έτσι έχουμε παραγωγή άμεσης και αρκετά αξιόπιστης εικόνας, μέσω ακτίνων -Χ πολύ χαμηλής ενέργειας, και επομένως, με προσεκτικό σχεδιασμό του όλου συστήματος, δεν δημιουργούνται προβλήματα ασφαλείας (όπως π.χ. στο σύγχρονο έλεγχο αποσκευών, στα αεροδρόμια).

### 3.8.3 Ξηροραδιογραφία

Η ξηροραδιογραφία (xeroradiography) χρησιμοποιεί πλάκες επικαλυμμένες με σελήνιο, το οποίο αρχικά φορτίζεται ηλεκτροστατικά και κατά τη ραδιογράφιση εκφορτίζεται τοπικά, ανάλογα με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας -X (όπως αυτή εξέρχεται από το δοκίμιο).

Με κατάλληλη «εμφάνιση» (απλά φυσώντας λευκή σκόνη επάνω στην πλάκα) παράγεται μη μόνιμη καταγραφή του ραδιογραφήματος ενώ με άλλη επεξεργασία παράγεται μόνιμη εικόνα (αμφότερες οι διεργασίες γίνονται σήμερα αυτοματοποιημένα).

Η ευκρίνεια που επιτυγχάνεται είναι παρόμοια με την περίπτωση χρήσης λεπτόκοκκου ραδιογραφικού φιλμ.

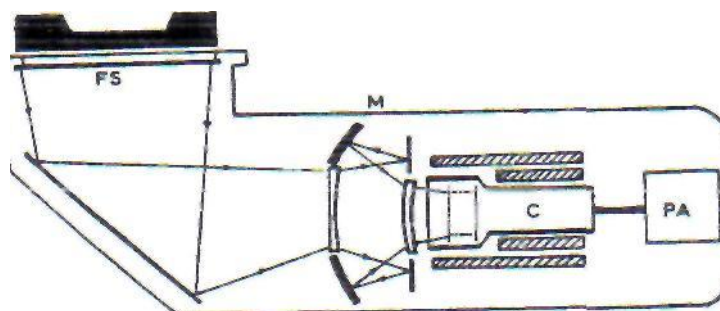
Προτέρημα της μεθόδου αποτελεί αφενός ο πολύ μικρός χρόνος επεξεργασίας της εικόνας, αφετέρου ότι οι πλάκες σεληνίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεκάδες ή και εκατοντάδες φορές (ως ότου φθαρούν ή γρατσουνιστούν). Η μέθοδος όμως δεν βρήκε εκτεταμένη βιομηχανική εφαρμογή, λόγω κυρίως της διαδικασίας που απαιτείται για την απόκτηση μόνιμης καταγραφής.

### 3.8.4 Απεικόνιση σε χαρτί

Η εταιρία Kodak έχει αναπτύξει μια διεργασία (την λεγόμενη Q-F) απεικόνισης ραδιογραφήματος πάνω σε χαρτί (χαρτί QF της Kodak), στο οποίο έχει τοποθετηθεί φωτογραφικό γαλάκτωμα. Το χαρτί τοποθετείται σε κασέτα και σε επαφή με φθορίζουσα ενισχυτική πλάκα και εμφανίζεται σε ειδική συσκευή. Η εικόνα παραμένει αναλλοίωτη για αρκετούς μήνες.

Οι ραδιογραφίες Q-F παράγονται με ακτίνες -X χαμηλών kV, έχουν πολύ μικρή ευκρίνεια, μικρή αντίθεση και μεγάλο εύρος, αλλά επίσης και πολύ μικρό κόστος. Χρησιμοποιούνται για περιπτώσεις όπου δεν ενδιαφέρει η λεπτομέρεια, (όπως π.χ. για την αναζήτηση ξένων σωμάτων όπως ξεχασμένα εργαλεία και βίδες σε κατασκευές αεροναυπηγικής αλλά και αναζήτηση μεγάλων σφαλμάτων σε κράματα ελαφρών μετάλλων).





**Εικόνα 3.9 :** Σύγχρονο σύστημα φθοροσκοπίας με τηλεόραση

FS : Φθορίζουσα οθόνη

M : Σύστημα καθρεπτών

C : Φωτοευαίσθητη κάμερα

PA : Προενισχυτής

E : Ηλεκτρονικό κύκλωμα

CC : Κινηματογραφική λήψη

VM : Οθόνη (monitor)

TR : Βιντεοσκόπηση

### 3.9 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΦΙΛΜ

#### 3.9.1 Εμφάνιση

Όπως έχουμε αναφέρει, όταν εκτεθεί το φιλμ φέρει επάνω του το αποτύπωμα της ακτινοβολίας όπως αυτή έχει εξέλθει από το ραδιογραφούμενο αντικείμενο, υπό την μορφή επίδρασης στους κρυστάλλους βρωμιούχου αργύρου.

Το αποτύπωμα αυτό, που ονομάζεται λανθάνουσα εικόνα (latent image) ούτε αναγνώσιμο είναι αλλά ούτε και αποτελεί μόνιμη καταγραφή, αφού μία νέα έκθεση (σε ακτίνες -X , -γ ή και φως), μπορεί να το αλλοιώσει ή καταστρέψει.

Προκειμένου να έχουμε αναγνώσιμη και μόνιμη ένδειξη απαιτείται η επεξεργασία του φιλμ, με πρώτο στάδιο την εμφάνιση.

Οι εμφανιστές (οργανικές ενώσεις όπως η hydroquinone) διασπούν τους εκτεθειμένους κρυστάλλους βρωμιούχου αργύρου αποδίδοντας μαύρο μεταλλικό άργυρο, ενώ αφήνουν ανέπαφους τους μη εκτεθειμένους. Πωλούνται σαν διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης ή και σαν σκόνη που αναμιγνύεται με νερό, σύμφωνα με

τις οδηγίες, του κατασκευαστή. Το διάλυμα είναι ελαφρά αλκαλικό (περιέχει και πολλά άλλα συστατικά, εκτός από τον κυρίως εμφανιστή) και κατά συνέπεια οξειδώνεται στον ελεύθερο αέρα. Συνιστάται επομένως να σκεπάζουμε όσο γίνεται καλύτερα το λουτρό εμφάνισης, εφόσον δεν χρησιμοποιείται (παρότι περιέχει και ουσίες που το προστατεύουν από την οξείδωση).

Ο βαθμός αμαύρωσης (πυκνότητα) του φιλμ, εξαρτάται και από το χρόνο που θα μείνει στο λουτρό εμφανιστή. Αύξηση του χρόνου (η της θερμοκρασίας) οδηγεί το φιλμ να συμπεριφέρεται ως ταχύτερο, αυξάνοντας την αμαύρωση, και ως μεγαλύτερης αντίθεσης, αυξάνοντας την αντίθεση και ελαττώνοντας το εύρος. Ταυτόχρονα όμως αυξάνεται και η ενυπάρχουσα δυσκρίνεια Uf.

Μετά από ορισμένες χρήσεις του λουτρού απαιτείται «αναγέννηση» (replenishment) του διαλύματος, προσθέτοντας μικρή ποσότητα από το αρχικό πυκνότερο διάλυμα ή συνηθέστερα από ειδικό διάλυμα που παρέχουν οι εξειδικευμένες εταιρείες. Μετά από αρκετές προσθήκες αναγεννητή (2-3 φορές το συνολικό όγκο του λουτρού) επιβάλλεται πλήρης αντικατάσταση με αρχικό διάλυμα.

Η ανάδευση της ραδιογραφίας επάνω-κάτω στο λουτρό εμφάνισης είναι απόλυτα απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη εμφάνιση. Συνιστάται ακόμη μετακίνηση της ραδιογραφίας και δεξιά-αριστερά. Μια καλή τεχνική επίσης είναι να βγάζουμε το φιλμ έξω από το λουτρό και να το κρατάμε λοξά, χτυπώντας το ελαφρά στα άκρα, ώστε να φεύγουν οι φυσαλίδες αέρα και να τρέχει το διάλυμα από την μία γωνία της ραδιογραφίας (και επαναλαμβάνουμε από την άλλη). Τελικά, αφήνουμε το φιλμ να στραγγίσει, όχι όμως επάνω από το λουτρό εμφάνισης.

Εκείνο που αποτελεί ουσιαστικό σημείο για την εμφάνιση του φιλμ (αλλά και για τα άλλα στάδια επεξεργασίας του), είναι η θερμοκρασία του λουτρού. Επιβάλλεται να κρατούμε σταθερή θερμοκρασία, προκειμένου να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα κάθε φορά (για τις ίδιες συνθήκες έκθεσης του φιλμ). Αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει επιτάχυνση της εμφάνισης (και το αντίθετο) και αν η θερμοκρασία του λουτρού δεν είναι σταθερή (συνήθως 68 βαθμούς Φαρενάϊτ ή 20 βαθμούς Κελσίου), πρέπει να αυξήσουμε ή μειώσουμε το χρόνο εμφάνισης, ανάλογα με τις σχετικές οδηγίες του κατασκευαστή. Θερμοκρασία μεγαλύτερη από 74 βαθμούς Φαρενάϊτ (24 βαθμούς Κελσίου), μπορεί να προκαλέσει θολότητα (fog) αλλά και άλλα προβλήματα. Εννοείται βεβαίως ότι και ο χρόνος εμφάνισης πρέπει να είναι σταθερός, για συγκεκριμένη θερμοκρασία και πυκνότητα (συγκέντρωση) του εμφανιστή. Συνήθως είναι 3 - 5 rain.

Ουσιαστικό είναι επίσης (όπως και για όλα τα υπόλοιπα στάδια) η καθαριότητα και η τάξη στον θάλαμο εμφάνισης, η μη ανάμειξη των διαφόρων λουτρών και η αποφυγή εκτίναξης σταγόνων οποιουδήποτε υγρού πάνω στο φιλμ (σε οποιοδήποτε στάδιο). Ακόμη, βασικό είναι ο φωτισμός ασφαλείας (συνήθως κόκκινος) να είναι κατάλληλος (χαμηλής έντασης και χωρίς διαφυγές άσπρου φωτός), προκειμένου να μην εκτίθεται και πάλι το φιλμ (προκαλώντας θολότητα - fog).

### **3.9.2 Διακοπή της εμφάνισης**

Γίνεται είτε με εκτεταμένη έκπλυση της ραδιογραφίας σε τρεχούμενο νερό είτε με σύντομη εμβάπτιση σε ειδικό λουτρό (stop bath), συνήθως διάλυμα οξικού οξέος, για να εξουδετερωθεί ο αλκαλικός εμφανιστής. Στη δεύτερη περίπτωση χρειάζεται προσοχή κατά την προετοιμασία του λουτρού, ώστε πάντοτε να προσθέτουμε οξύ στη δεξαμενή με νερό και ποτέ αντίστροφα.

Η έκπλυση με νερό πρέπει να διαρκεί τουλάχιστον 2 λεπτά, ενώ η εμβάπτιση σε όξινο λουτρό τουλάχιστον 0.5 λεπτά και να συνοδεύεται από ελαφρά ανάδευση.

Συνδυασμός έκπλυσης και όξινου λουτρού βοηθά στην επιμήκυνση της ζωής του όξινου λουτρού.

Η ραδιογραφία μεταφέρεται στο επόμενο λουτρό (σταθεροποιητή) χωρίς να αφεθεί να στραγγίσει.

Ξέπλυμα ή λουτρό διακοπής εμφάνισης χρειάζονται επίσης και τα μεταλλικά στηρίγματα του φιλμ, διότι από εκεί μπορεί να τρέξει επιπλέον εμφανιστής στο φιλμ ή τουλάχιστον να μεταφερθεί εμφανιστής στο λουτρό σταθεροποίησης.

Το στάδιο διακοπής δεν χρησιμοποιείται στην αυτόματη εμφάνιση, διότι αντικαθίσταται από την πίεση του φιλμ μεταξύ των μεταφορικών κυλίνδρων της συσκευής.

### **3.9.3 Στερέωση (fixing)**

Είναι επίσης όξινο διάλυμα και εξυπηρετεί δύο σκοπούς:

1) Απομακρύνει τους μη εκτεθειμένους κρυστάλλους βρωμιούχου αργύρου, διότι ειδάλλως θα μπορούσαν να εκτεθούν στο φως και να συμβεί αργή μεν αλλά σίγουρη εμφάνιση, στον ατμοσφαιρικό αέρα.

2) Σκληραίνει το γαλάκτωμα του φιλμ (αιώρημα βρωμιούχου αργύρου σε ζελατίνη), προσδίδοντας σ' αυτό μεγαλύτερη μηχανική αντοχή αλλά και ταχύτερο και ασφαλέστερο στέγνωμα.

Όταν το φιλμ μπαίνει στο λουτρό στερέωσης (fixer), η ραδιογραφική εικόνα έχει μία θολότητα που χάνεται γρήγορα και σύντομα αποκαθίσταται πλήρης ευκρίνεια.

Ο χρόνος καθαρισμού της εικόνας (clearing time) είναι ο μισός (ή λιγότερος) από τον συνολικά απαιτούμενο χρόνο στερέωσης.

Απαιτείται βίαιη ανάδευση του φιλμ για τουλάχιστον τα πρώτα δύο λεπτά και κάθε δύο επόμενα λεπτά.

Χρόνοι στερέωσης μεγαλύτεροι από 15 λεπτά πρέπει να αποφεύγονται, διότι υπάρχει απώλεια των λεπτομερειών χαμηλής αμαύρωσης αλλά και ενδέχεται να δημιουργηθούν και άλλα προβλήματα.

Το χρησιμοποιούμενο διάλυμα σταθεροποίησης περιέχει αρκετή ποσότητα αργύρου και ενίοτε είναι εκμεταλλεύσιμο.

Η παρακολούθηση της δραστηριότητας του λουτρού στερέωσης και η αντικατάσταση του στους κανονικούς χρόνους είναι πολύ σημαντική για τη σωστή στερέωση.

### **3.9.4 Ξέπλυμα του φιλμ**

Πρέπει όλα τα χημικά να απομακρυνθούν καλά τόσο από το φιλμ όσο ακόμη και από τα μεταλλικά σπηρίγματα που χρησιμοποιήσαμε. Εάν δεν απομακρυνθεί όλος ο στερεωτής, μετά από μακρό χρονικό διάστημα το φιλμ θα αποκτήσει ένα χαρακτηριστικό καφέ χρώμα. Η έκπλυση πρέπει να γίνεται σε τρεχούμενο νερό με θερμοκρασία 60 - 70 βαθμούς Φαρενάιτ (15-21 βαθμούς Κελσίου) και για 10 - 30 λεπτά. Συνιστάται επίσης η εμβάπτιση του φιλμ σε νερό με διαβρεκτικό παράγοντα (wetting agent, ειδικό διάλυμα απορρυπαντικής δράσης), ώστε να αποφεύγεται η παραμονή σταγόνων νερού στο φιλμ, διότι αυτές θα οδηγήσουν σε σχηματισμό κηλίδων κατά το επόμενο στάδιο (στέγνωμα του φιλμ).

Κατά την αυτόματη εμφάνιση, ή εμβάπτιση του φιλμ σε διαβρεκτικό παράγοντα δεν είναι απαραίτητη, διότι πάλι αντικαθίσταται από την πίεση του φιλμ στους μεταφορικούς κυλίνδρους.

### **3.9.5 Στέγνωμα του φιλμ**

Μπορεί να γίνει στον ελεύθερο αέρα, σε ρεύμα αέρα ή σε ειδικό ξηραντήριο (με ρεύμα θερμού αέρα). Το φιλμ πρέπει να αναρτάται με απλά κλιπς και όχι στα συρταρωτά στηρίγματα που ενδεχόμενα χρησιμοποιήθηκαν κατά την εμφάνιση του. Επίσης δεν πρέπει να κρεμιέται λοξά (από την μια γωνία του).

Μετά το πλήρες στέγνωμα συνιστάται να κόβονται οι αιχμηρές γωνίες του και οι πλευρές εκείνες που φέρνουν σημάδια από την ανάρτηση του. Σε όλα τα στάδια επεξεργασίας του φιλμ, συνιστάται η αποφυγή επαφής (και ιδιαίτερα τριβής) μεταξύ των φιλμ.

### **3.9.6 Υλικά των δεξαμενών επεξεργασίας**

Οι δεξαμενές επεξεργασίας του φιλμ συνιστάται να κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου AISI 316 (με 2%-3% μολυβδαίνιο, για να αποφεύγεται πλήρως η διάβρωση). Υλικά όπως αλουμίνιο, γαλβανισμένος χάλυβας ή κασσίτερος πρέπει να αποφεύγονται, διότι προκαλούν επιμόλυνση (contamination) των υγρών επεξεργασίας του φιλμ και επομένως σημαντικά προβλήματα, ακόμη και αν έλθουν σε απλή επαφή μαζί τους. Άλλα κατάλληλα υλικά είναι τα πλαστικά, το γυαλί και τα πορσελανοποιημένα κεραμικά. Στο θάλαμο εμφάνισης είναι απαραίτητο ένα καλό σύστημα εξαερισμού.

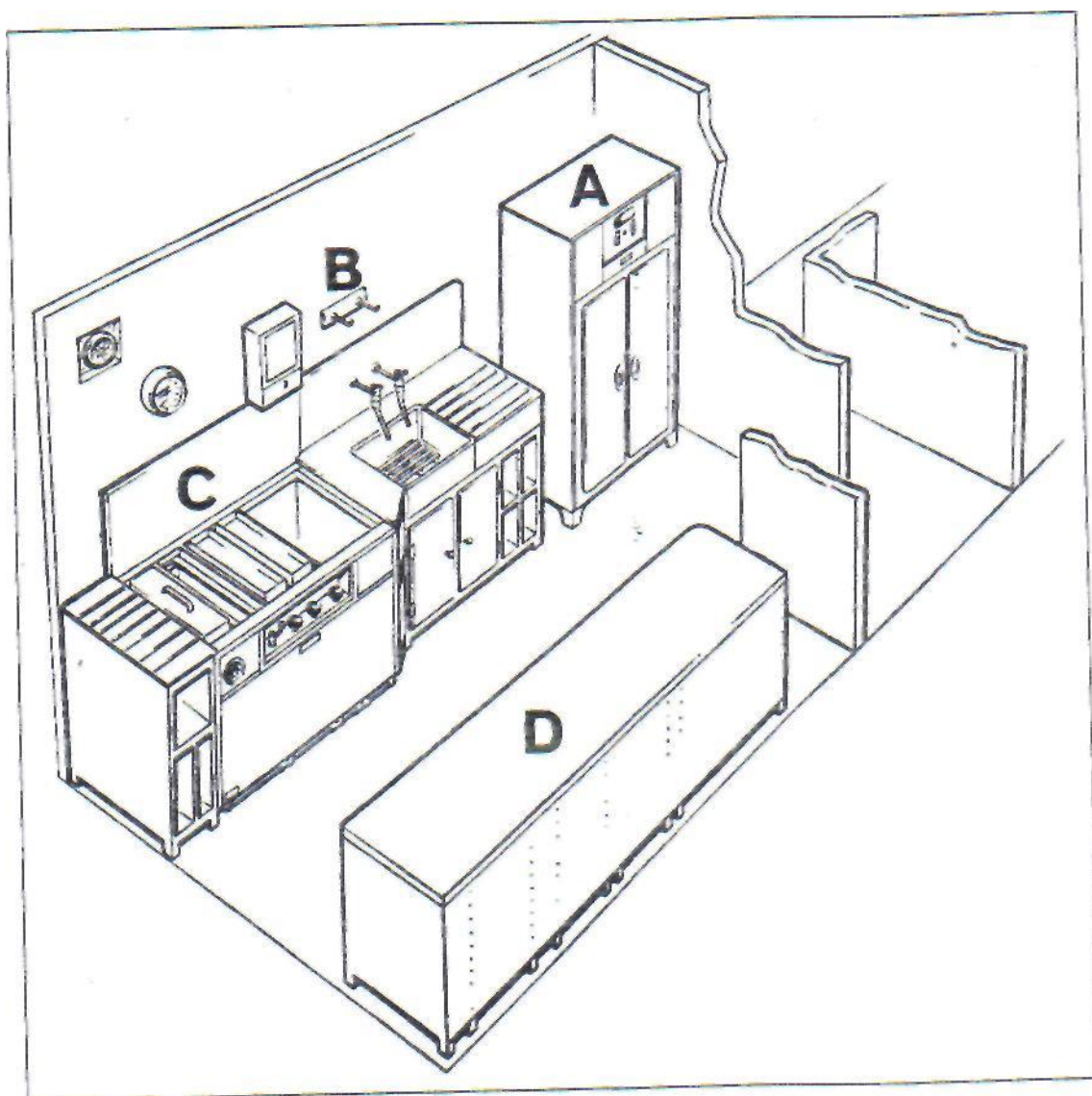
### **3.9.7 Αυτόματη εμφάνιση του φιλμ**

Τα αυτόματα εμφανιστήρια χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότερο, διότι απελευθερώνουν ανθρώπινο δυναμικό, εμφανίζουν σε πολύ σύντομο χρόνο (λιγότερο από 13min σε σχέση με τουλάχιστον 60min που απαιτούνται μέχρι την ξήρανση του φιλμ χειρωνακτικά) και παρέχουν σταθερής ποιότητας εμφάνιση (εφόσον συντηρούνται συστηματικά και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή). Χρησιμοποιούν ειδικό εμφανιστή και στερεωτή και η διαρκής ανάδευση του φιλμ αλλά και η διακοπή της εμφάνισης γίνονται από το ίδιο το σύστημα μεταφοράς του φιλμ στα διάφορα λουτρά, δηλαδή τους ειδικούς κυλίνδρους.

Το μειονέκτημα ενός αυτόματου συστήματος, ακόμη και αν είναι υψηλής ποιότητας και συντηρείται σωστά, είναι η αδυναμία επέμβασης στο χρόνο ή τη θερμοκρασία εμφάνισης, ώστε να βελτιωθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του φιλμ.

Η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι συνήθως υψηλότερη από ό,τι συνιστάται στα χειρωνακτικά συστήματα (81-85° F, 27-28° C) και του νερού έκπλυσης περί τους 5° F (3°C) χαμηλότερη από την προηγούμενη.

Κατά την τροφοδοσία της συσκευής με τα διάφορα χημικά , είναι πολύ ουσιαστικό να τηρείται η σειρά που δίνει ο κατασκευαστής (π.χ. πρώτα ο στερεωτής) για να μην υπάρχει επιμόλυνση των χημικών. Τυχαία ανάμιξη στερεωτή στον εμφανιστή σε αναλογία έστω και 1%, επηρεάζει δραστικά την ποιότητα της εμφάνισης



**ΕΙΚΟΝΑ 3.10:** Τυπική διάταξη εμφανιστηρίου

### 3.10 ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

#### 3.10.1 Ελαττώματα που προκαλούνται πριν από την εμφάνιση

##### ♦ Χημική ομίχλη (fog) - θολότητα

Ως χημική ομίχλη ή θολότητα ή απλώς ομίχλη (fog) ορίζεται η έκθεση των κρυστάλλων του γαλακτώματος (άρα και η σχετική αμαύρωση) για λόγους άλλους από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας -X ή -γ που εμείς προκαλούμε.

Η ομίχλη είναι περισσότερο εμφανής σε λιγότερο φωτεινές περιοχές του ραδιογραφήματος και μπορεί να είναι γενική ή τοπική (αναλόγως της αιτίας που την προκάλεσε).

Αίτια ομίχλης μπορεί να είναι:

α) Έκθεση του φιλμ (ή μέρους του) σε ορατό φως. Συνήθως από το φως του σκοτεινού θαλάμου εμφάνισης, όταν είναι πολύ μεγάλης έντασης, είτε όταν το φίλτρο της λάμπας καταστραφεί μερικά ή ολικά.

β) Έκθεση σε φως ή ακτινοβολία -X κατά λάθος (π.χ. από ελαττωματικές κασέτες ή κακό χειρισμό).

γ) Κακές συνθήκες αποθήκευσης των μη εκτεθειμένων φιλμ. Ιδιαίτερα όταν υπάρχει υψηλή θερμοκρασία και υγρασία ή ατμοί ορισμένων χημικών ουσιών.

δ) Φυσική γήρανση του φιλμ

Όλα τα φιλμ, και ιδιαίτερα τα γρήγορα, με την πάροδο το χρόνου παρουσιάζουν ομίχλη και επομένως δεν θα πρέπει να διατηρούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

ε) Μεγάλος χρόνος εμφάνισης

Παρουσιάζεται ιδιαίτερα στα γρήγορα φιλμ και μάλιστα όταν η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι υψηλή. Ακόμη και υπερβολική ανάδευση του εμφανιστή, μπορεί να προκαλέσει ομίχλη.

Η μέγιστη επιτρεπτή γενική χημική ομίχλη δίνεται επίσης από ορισμένες προδιαγραφές και εκφράζεται σε μονάδες πυκνότητας εμφανισμένου φιλμ, χωρίς αυτό να έχει εκτεθεί σε -X ή -γ (π.χ. 0,2 για τα πιο αργά φιλμ και 0,6 για τα πιο γρήγορα). Στην πυκνότητα αυτή συνεισφέρει βεβαίως και ο ελαφρός χρωματισμός της βάσης του φιλμ.

#### ♦ **Μαύρα σημάδια από πίεση (μετά την έκθεση)**

Εάν το φιλμ πιεστεί ή λυγίσει πολύ (τσακίσει) μετά από την έκθεση, παρουσιάζονται στο ραδιογράφημα μαύρα σημάδια, στα σημεία πίεσης ή τσακίσματος. Συνήθως έχουν πολύ χαρακτηριστικό σχήμα: τόξου, μικρού κύκλου ή «νυχιάς». Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερο συχνό, όταν χρησιμοποιούνται εύκαμπτες πλαστικές κασέτες.

#### ♦ **Λευκά σημάδια από πίεση (πριν την έκθεση)**

Όπως προηγουμένως, αλλά προξενούνται από πίεση η τσάκισμα του φιλμ πριν αυτό εκτεθεί.

#### ♦ **Κηλίδες και γραμμές από ενισχυτικές πλάκες**

Βαθιές αμυχές (γρατσουινιές) στις ενισχυτικές πλάκες προκαλούν μεγαλύτερη εκπομπή ηλεκτρονίων (ανά μονάδα επιφάνειας) και επομένως εμφανίζονται σαν μαύρα σημάδια ή γραμμές, στην περίπτωση μεταλλικών πλακών (και λευκά στην περίπτωση των φθοριζουσών).

#### ♦ **Ξένες ύλες μεταξύ ενισχυτικών πλακών και φιλμ**

Απορροφούν ακτινοβολία και επομένως εμφανίζονται σαν λευκά σωματίδια (τέτοια είναι και η περίπτωση lead pick-up, όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικές ενισχυτικές πλάκες). Σχετικό σφάλμα είναι και η εμφάνιση της δομής του χαρτιού, όταν αυτό τοποθετηθεί μεταξύ φιλμ και ενισχυτικής πλάκας.

#### ♦ **Σημάδια στατικού ηλεκτρισμού**

Προκαλούνται συχνά με τη γρήγορη εξαγωγή του φιλμ από την κασέτα ή τον φάκελο (στην περίπτωση έτοιμων φιλμ). Εμφανίζονται σαν μαύρες χαρακτηριστικές γραμμές που θυμίζουν στιγμιαία αποτύπωση αστραπών. Οφείλονται σε στατικό ηλεκτρισμό που αναπτύχθηκε με την τριβή του φιλμ στις ενισχυτικές πλάκες ή στα φύλλα χαρτιού που το περιβάλλουν.

Το ξηρό περιβάλλον ευνοεί την εμφάνιση του φαινομένου.

#### ♦ **Δακτυλικά αποτυπώματα**

Τα δάκτυλα μας συχνά έχουν ελαφρό στρώμα φυσικών ελαίων. Όταν πιάσουμε το φιλμ πριν την εμφάνιση του με όχι καθαρά χέρια, τα έλαια αυτά εμποδίζουν στη



συνέχεια την εμφάνιση και εμφανίζονται στο ραδιογράφημα σαν λευκά δακτυλικά αποτυπώματα.

♦ **Εμφανιστής στο φιλμ (πριν την εμφάνιση)**

Προκαλεί την τοπική αμαύρωση του φιλμ.

♦ **Νερό στο φιλμ (πριν την εμφάνιση)**

Προκαλεί ελαφρώς μεγαλύτερη αμαύρωση, όταν εμφανιστεί το φιλμ.

♦ **Σταθεροποιητής στο φιλμ (πριν την εμφάνιση)**

Σταγόνες σταθεροποιητή στο φιλμ πριν την εμφάνιση, εμφανίζονται στο ραδιογράφημα σαν λευκές κηλίδες, που όμως γυαλίζουν όταν φωτίσουμε το φιλμ από τα πλάγια.

♦ **Στίγματα περίθλασης (Diffraction Mottling)**

Έχουν εμφάνιση μαύρων στιγμάτων, παρόμοιων με εκτεταμένους πόρους μικρών σχετικά διαστάσεων. Παρουσιάζονται κυρίως σε χονδρόκοκκα υλικά, όπως χυτό αλουμίνιο και ωστενιτικούς χάλυβες, αλλά πολύ σπάνια σε κοινούς χάλυβες χαμηλού άνθρακα (ακόμη και όταν είναι χυτοί).

Είναι δυνατόν να εξιχνιαστεί εάν πρόκειται για περίθλαση της ακτινοβολίας στους κόκκους του υλικού ή για πορώδες του υλικού, περιστρέφοντας ελαφρά το δοκίμιο (1-5 μοίρες) και παρατηρώντας εάν περιστράφηκαν αντίστοιχα και οι ενδείξεις (οπότε πράγματι είναι πορώδες).

Το φαινόμενο εξουδετερώνεται με μικρή αύξηση των kV είτε με χρήση φίλτρων (διότι το συναντάμε κυρίως σε ραδιογράφιση με χαμηλά kV).

Ενδέχεται όμως η παρουσία του φαινομένου να σημαίνει και ατέλεια του υλικού και συγκεκριμένα την ύπαρξη μεγάλων κόκκων, ενώ αυτό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει.

### **3.10.2 Ελαττώματα που προξενούνται κατά την εμφάνιση**

♦ **Γραμμώσεις από εμφανιστή**

Προκαλούνται όταν το φιλμ δεν αναδεύεται προς όλες τις διευθύνσεις μέσα στο λουτρό εμφάνισης και έχουν συχνά εικόνα μαύρων λωρίδων, παράλληλων, προς τα άκρα του φιλμ.

#### ♦ Φυσαλίδες αέρα

Εμφανίζονται σαν ανοιχτόχρωμες στρογγυλόμορφες κηλίδες και οφείλονται στην προσκόλληση φυσαλίδων αέρα στο φιλμ, όταν αυτό βρίσκεται στο λουτρό εμφανιστή (και ιδιαίτερα στο πρώτο στάδιο).

#### ♦ Εμφάνιση δικτυώματος (reticulation)

Προκαλείται όταν υπάρχει σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των λουτρών (εμφανιστή, στερεωτή, έκπλυσης κλπ), ιδιαίτερα εάν η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι πολύ υψηλή (αρκετά πάνω από 24 βαθμούς Κελσίου). Το γαλάκτωμα ρυτιδώνει και εμφανίζεται σαν δικτυωτό είτε σαν εξαιρετικά κοκκώδες.

#### ♦ Απώλεια του γαλακτώματος (frilling)

Προκαλείται από υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία εμφανιστή ή στερεωτή, καθώς και από υπερβολικά εξασθενημένο διάλυμα στερεωτή. Το γαλάκτωμα φεύγει τελείως και απομένει η πλαστική βάση του φιλμ.

#### ♦ Σημάδια από στέγνωμα του φιλμ

Προκαλούνται από σταγόνες νερού που παραμένουν υγρές, παρότι το υπόλοιπο φιλμ είχε στεγνώσει.

Εμφανίζονται σαν μαύρες στρογγυλες κηλίδες ή σαν μαύρες λωρίδες, που γυαλίζουν όταν φωτιστούν από τα πλάγια, (όπως εξάλλου όλα τα σχετικά σφάλματα του φιλμ, που δημιουργούνται κατά την εμφάνιση).

#### ♦ Μεταλλικά ρινίσματα στο λουτρό εμφάνισης

Προκαλούν μαύρα στίγματα ή και λωρίδες, λόγω ενίσχυσης της εμφάνισης, όταν βρίσκονται σε επαφή με το εμφανιζόμενο φιλμ.

## 4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ

### 4.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος Διεισδυτικών Υγρών (ορθότερα ίσως Διεισδυτικών Βαφών –Dye Penetrants) έχει σαν πρόδρομο της τη μέθοδο Λαδιού και Κιμωλίας (Oil and Whiting), που εφαρμοζόταν για την εύρεση μεγάλων επιφανειακών ασυνεχειών στη βιομηχανία σιδηροδρόμων της Αμερικής ήδη από το 1890.

Η σύγχρονη μέθοδος βασίζεται στην εργασία του De Forest της Magnaflux Corporation (1938) και του R.Switzer (που προσέφερε τα δικαιώματα στην Magnaflux Corp το 1942).

Η πρώτη εμπορική εμφάνιση της μεθόδου έγινε από την ανωτέρω εταιρεία τον Ιούλιο του 1942 και αφορούσε Υδατοαφαιρούμενα Φθορίζοντα Διεισδυτικά, με την εμπορική ονομασία Zyglo.

### 4.2 ΤΟ ΤΡΙΧΩΕΙΔΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η μέθοδος Διεισδυτικών Υγρών βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο, που περιγράφουμε κατωτέρω:

Εάν ένας στενός σωλήνας βυθιστεί σε ένα υγρό, τότε ενδέχεται η στάθμη του υγρού στο σωλήνα να ανέβει πάνω από την επιφάνεια του υγρού (θετικό τριχοειδές) ή να κατέλθει κάτω από αυτήν (αρνητικό τριχοειδές). Παραδείγματα θετικού τριχοειδούς φαινομένου υπάρχουν πολλά και στην καθημερινή ζωή, όπως το λάδι που διαποτίζει το φυτίλι του καντηλιού, τα φυσικά και τεχνητά σφουγγάρια, τα βαμβακερά εσώρουχα που απορροφούν τον ιδρώτα αλλά ακόμη και η κυκλοφορία του νερού και των χυμών στα φυτά και τα δέντρα.

Η τριχοειδής δράση (capillary action, capilarity) εξαρτάται από:

α. Την **επιφανειακή τάση** του υγρού-διεισδυτή. Θεωρούμε ότι υγρά με μικρή επιφανειακή τάση παρουσιάζουν υψηλότερη τριχοειδή δράση, αν και η πραγματικότητα είναι κάπως πολύπλοκη.

β. Τη **γωνία επαφής** του υγρού. Όσο μικρότερη είναι η γωνία επαφής, τόσο μεγαλύτερη και η τριχοειδής δράση. Η γωνία επαφής καθορίζει την **διαβρεκτική ικανότητα** (wetting ability) του υγρού, δηλαδή την ικανότητα του να διαβρέχει μία επιφάνεια (να απλώνεται πάνω σε αυτήν).

Παρόλο που γωνία επαφής μικρότερη από 90° σημαίνει θετικό τριχοειδές, οι σύγχρονοι διεισδυτές έχουν γωνία μικρότερη από 5°, άρα το φαινόμενο πρακτικά σήμερα εξαρτάται από την επιφανειακή τάση του διεισδυτή.

γ. Τη διάμετρο του σωλήνα. Όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερη η τριχοειδής δράση.

Η πίεση του τριχοειδούς φαινομένου στην περίπτωση διεισδυτή-ρήγματος, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$P = 2S \times \cos \theta \quad (4.1)$$

όπου  $\delta$  η επιφανειακή τάση του υγρού διεισδυτή,  $\theta$  η γωνία επαφής και  $W$  το πλάτος του ρήγματος. Η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη της μιας ατμόσφαιρας, οπότε η μέθοδος εφαρμόζεται άνετα και σε κατακόρυφες ή ανεστραμμένες θέσεις.

Σημείωση: Η επιφανειακή τάση  $\delta$  έχει μονάδες Δυνάμεως προς Μήκος:

$$[P] = \frac{[F]}{[L]} \quad (4.2)$$

Μεγάλη σημασία όμως στο φαινόμενο έχει και η καθαρότητα του εσωτερικού του σωλήνα, η επιφανειακή τραχύτητα και η μεγάλη συνάφεια (πρόσφυση, adhesion) μεταξύ του διεισδυτή και του σωλήνα.

δ. Το ιξώδες του διεισδυτή έχει να κάνει μόνο με την ταχύτητα διείσδυσης. Μικρό ιξώδες σημαίνει λεπτόρρευστο υγρό και μεγάλη ταχύτητα διείσδυσης. Οι σημερινοί διεισδυτές έχουν γενικά ιξώδες μικρότερο από 5 centistokes (σε θερμοκρασία 20° C). Πολύ μικρό ιξώδες όμως ενδεχόμενα σημαίνει υπερβολική έκπλυση του διεισδυτή που εισήλθε στην ασυνέχεια, στη φάση της αφαίρεσης του επιφανειακού διεισδυτή.

Γενικά απαιτείται συνδυασμός πολλών ιδιοτήτων για να έχουμε έναν καλό διεισδυτή, όπως μικρή συνοχή (cohesion) μεταξύ των μορίων του, μεγάλη συνάφεια (adhesion) μεταξύ μορίων διεισδυτή-δοκιμίου, υψηλό σημείο ανάφλεξης (flash point), χημική αδράνεια με το υλικό του δοκιμίου, υψηλή διαβρεκτική ικανότητα, μικρή πτητικότητα, μικρό ειδικό βάρος (για να μην κατακαθίζει στη δεξαμενή), υψηλή διαλυτότητα βαφής, μη τοξικότητα κ. ά.

### 4.3 ΕΞΟΛΚΗΣΗ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΤΗΣ

Το τριχοειδές φαινόμενο, προκειμένου για εφαρμογή διεισδυτικών υγρών σε επιφανειακές ασυνέχειες, είναι αντιστρέψιμο. Πολλοί διεισδυτές έχουν την τάση (ειδικά εάν γεμίσουν όλη την ασυνέχεια) να «έρπουν» προς τα έξω και να επανεμφανίζονται στην επιφάνεια. Η δράση αυτή λέγεται **εξόλκηση** (απορρόφηση, blotting action) και βεβαίως ενισχύεται πάντα με την εφαρμογή του εμφανιστή, δηλαδή ενός μέσου στο οποίο το τριχοειδές φαινόμενο είναι ισχυρότερο από ό,τι στην ασυνέχεια.

Οι καλύτεροι εμφανιστές είναι πάντοτε (στην τελική τους μορφή) στρώματα ελαφράς και «πτητικής» (fluffy) σκόνης (παράβαλε το ταλκ ή την πούδρα για την αφαίρεση υγρασίας από την επιδερμίδα).

Συνιστάται να γίνεται πάντοτε χρήση εμφανιστή, για το σωστό έλεγχο της εξόλκησης.

### 4.4 ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ο διεισδυτής είναι μίγμα διεισδυτικού υγρού και βαφής (ορατής ή φθορίζουσας). Εισέρχεται σε μία ασυνέχεια, βάσει του τριχοειδούς φαινομένου, εφόσον αυτή είναι ανοικτή εξωτερικά και σχετικά καθαρή εσωτερικά.

Μετά το χρόνο διείσδυσης λαμβάνει χώρα το τριχοειδές φαινόμενο στην αντίθετη διεύθυνση (εξόλκηση) και ο διεισδυτής, μαζί με τη βαφή, βγαίνουν στην επιφάνεια.

Με κατάλληλη αντίθεση (π.χ. άσπρο υπόστρωμα και ορατή βαφή ή σκοτεινό περιβάλλον και φθορίζουσα βαφή) σχηματίζεται μια ορατή ένδειξη, που αντιπροσωπεύει την ασυνέχεια.

### 4.5 ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

1. Προκαθορισμός της επιφάνειας - Ξήρανση
2. Εφαρμογή διεισδυτή- Χρόνος διείσδυσης
3. Αφαίρεση του επιφανειακού διεισδυτή - Ξήρανση
4. Εφαρμογή εμφανιστή - Ξήρανση - Εξόλκηση
5. Παρατήρηση των ενδείξεων - Καταγραφή
6. Μετα-καθαρισμός της επιφάνειας

#### 4.5.1 Προκαθαρισμός και Ξήρανση της επιφάνειας

Η ασυνέχεια πρέπει οπωσδήποτε να είναι ανοικτή στην επιφάνεια, προκειμένου να έχουμε διείσδυση μέσω τριχοειδούς φαινομένου.

Πρέπει επομένως να είναι καθαρή από άλατα, χαλαρή σκουριά και ανόργανες ύλες αλλά και από υγρά (λάδια, νερό ή υγρασία).

Τα σταγονίδια του νερού/υγρασίας μπορούν πολύ εύκολα να εμποδίσουν τη διείσδυση και γι' αυτό η εφαρμογή του διεισδυτή γίνεται πάντοτε σε ξηρή επιφάνεια.

Η αφαίρεση οργανικών ουσιών γίνεται με διαλύτες (solvents, cleaners) ή απορρυπαντικά ή γαλακτωματοποιητές. Η σχετική δόνηση που προσφέρει ένα λουτρό διαλύτη ή απορρυπαντικού με ταυτόχρονη εφαρμογή υπερήχων, βοηθά στον καλύτερο καθαρισμό. Χρησιμοποιούνται υπέρηχοι χαμηλής συχνότητας, αλλά πάντως πάνω από 20 kHz.

Η αποτελεσματικότερη μέθοδος προκαθορισμού είναι η «**απολίπανση με ατμό**» (vapour degreasing), όπου ατμοί διαλύτη διαλύουν τους οργανικούς ρύπους, διεισδύοντας ακόμη και μέσα στις επιφανειακές ασυνέχειες. Το δοκίμιο έχει τοποθετηθεί σε μία ζώνη ψυχρού αέρα, πάνω από το λουτρό του διαλύτη, οπότε οι ατμοί υγροποιούνται και, μέσω βαρύτητας, επιστρέφουν σαν σταγόνες υγρού στο λουτρό, παρασέρνοντας και τους διαλυμένους οργανικούς ρύπους.

Η αφαίρεση ανόργανων ρύπων (σκουριές, άλατα κ.λπ.) γίνεται με μηχανικό τρόπο ή με χημικά μέσα (χημική προσβολή-etching με μίγμα οξέων ή προσβολή με αλκάλια). Χρειάζεται μεγάλη προσοχή σε ορισμένα μηχανικά μέσα (π.χ. αμμοβολή, τρόχισμα), διότι είναι πιθανό να «κλείσουν» τα χείλη της ασυνέχειας στην επιφάνεια (reening), ιδίως αν το υλικό του δοκιμίου είναι μαλακό, είτε απλώς να «γεμίσουν» με προϊόντα του καθαρισμού (από την αμμοβολή ή τα ρινίσματα του τροχίσματος) και να εμποδιστεί η διείσδυση. Παρόμοιοι προκαθορισμοί είτε απαγορεύονται από τις προδιαγραφές είτε ακολουθούνται από χημική προσβολή (etching) για να καθαρίσουν τα χείλη της ασυνέχειας και πάντως μειώνουν την ευαισθησία της μεθόδου.

Επιφανειακός ρυπαντής θεωρείται και κάθε όξινο υλικό (π.χ. χρωμικά, δηλ. οξείδια του Χρωμίου), διότι όλα τα οξέα βλάπτουν την ικανότητα φθορισμού των φθοριζόντων διεισδυτών.

Είναι ενδιαφέρον ότι καλός προκαθορισμός (ιδίως λείανση με λεπτό σμυριδόχαρτο και χημική προσβολή-etching) μπορεί να καταστήσει ορατά πολλά επιφανειακά ρήγματα, χωρίς περαιτέρω διαδικασία.

#### 4.5.2 Εφαρμογή Διεισδυτή - Χρόνος Διείσδυσης

Στη μέθοδο Δ.Υ. υπάρχουν πολλές και διάφορες αντιξοότητες και μόνον ένας «σύμμαχος»: ο χρόνος διείσδυσης.

Η συντριπτική πλειοψηφία των προδιαγραφών δίνει μόνον κάτω όρια (ελάχιστο χρόνο διείσδυσης), συνήθως μεταξύ 10 και 30 λεπτών. Εάν η ασυνέχεια περιέχει ξένες ουσίες (όπως π.χ. προϊόντα διάβρωσης σε ασυνέχειες δυναμοδιάβρωσης ή περικρυσταλλικής διάβρωσης), ο χρόνος διείσδυσης προδιαγράφεται εξαιρετικά υψηλός (4 ώρες τουλάχιστον). Σε περιπτώσεις ρηγμάτων κοπώσεως συνιστάται χρόνος μεγαλύτερος των 30 λεπτών.

Συχνά υπάρχει ο αβάσιμος φόβος να «στεγνώσει ο διεισδυτής μέσα στην ασυνέχεια και να μην είναι δυνατή η εξόλκηση. Αυτό είναι μεγάλο λάθος, ιδιαίτερα εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν είναι πολύ υψηλή ή εάν το δοκίμιο δεν έμεινε για πολλές ώρες κάτω από καυτό ήλιο. Αρκεί να θυμηθούμε ότι όλοι σχεδόν οι διεισδυτές είναι ελαιώδους βάσεως και περιέχουν μίγμα υγρών, μεταξύ των οποίων ορισμένα δεν είναι καθόλου πτητικά ούτε ξηραίνονται εύκολα. Αντίθετα, το να ελαττωθούν τα πτητικά από τον διεισδυτή, σημαίνει μεγαλύτερη συγκέντρωση βαφής και άρα εντονότερη ένδειξη.

Το βασικό πρόβλημα, στην περίπτωση μεγάλων χρόνων διείσδυσης (ώρες πάντως και όχι λεπτά), είναι ότι γίνεται πιο δύσκολη η αφαίρεση του επιφανειακού διεισδυτή (επόμενο στάδιο της μεθόδου). Αρκεί όμως η εφαρμογή νέου διεισδυτή στην επιφάνεια για 1-2 λεπτά, οπότε και αυτή η δυσκολία παύει να υπάρχει (αλλά και προσφέρονται λεπτόρρευστα και πτητικά υγρά, που θα βοηθήσουν τη γρήγορη εξόλκηση).

Οι διεισδυτές εφαρμόζονται με πολλούς τρόπους, όπως βύθιση, ψεκασμό ή πινέλο. Συνιστούμε να αποφεύγεται ο ψεκασμός (διότι λερώνει τον περιβάλλοντα χώρο) και να προτιμάται η εφαρμογή με πινέλο/βούρτσα.

Ο αποτελεσματικότερος τρόπος εφαρμογής διεισδυτή είναι με βύθιση και «στράγγιση» (dip and drain), όπου το δοκίμιο βυθίζεται για λίγο σε λουτρό διεισδυτή και κατόπιν τοποθετείται σε σχάρα για να «στραγγίσει». Το στράγγισμα αυτό βοηθά στην απομάκρυνση των πλέον πτητικών ουσιών, άρα στην αύξηση του ποσοστού βαφής στο διεισδυτή και οδηγεί στην εμφάνιση πιο έντονων ενδείξεων. Η θερμοκρασία του δοκιμίου, κατά την εφαρμογή του διεισδυτή αλλά και στη συνέχεια, δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 50° C.

Η θέση του δοκιμίου δεν παίζει κανένα απολύτως ρόλο, μια και η πίεση από το τριχοειδές φαινόμενο είναι μεγαλύτερη της μιας ατμόσφαιρας (10 m νερού) και η βαρύτητα δεν έχει κανένα ρόλο στη διείδυση (εκτός ίσως από το να παράγει ανεπιθύμητες ψευδείς ενδείξεις).

Οι βαφές που περιέχει ο διείδυτής είναι είτε **ορατές** (συνήθως κόκκινου χρώματος) είτε **φθορίζουσες** (κιτρινοπράσινες, κάτω από το μαύρο φως). Υπάρχουν και βαφές **διπλής ευαισθησίας** (dual sensitivity), κόκκινες στο ορατό και κίτρινες-πορτοκαλί στο μαύρο φως, με σαφώς όμως μικρότερη ευαισθησία από τις φθορίζουσες.

Η θερμοκρασία του δοκιμίου, κατά το χρόνο διείδυσης, πρέπει να είναι μεταξύ 10°C και 50°C. Χαμηλότερες θερμοκρασίες σημαίνουν πολύ σημαντική αύξηση του χρόνου διείδυσης (περίπου διπλασιασμό για κάθε -10 C). Μικρή θέρμανση του δοκιμίου, πριν την εφαρμογή του διείδυτή, βοηθά τη διείδυση, διότι ανοίγει ελαφρά τα χείλη της ασυνέχειας, χαλαρώνει τους ρυπαντές στην εσωτερική επιφάνεια και διώχνει την υγρασία και τυχόν πτητικούς ρυπαντές. Δεν συνιστάται όμως το αντίστροφο, δηλαδή χρήση θερμού διείδυτή.

Ειδική κατηγορία διείδυτών είναι αυτοί που δεν έχουν ελαιώδη βάση αλλά υδατική ή αλκοολούχα και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές (π.χ. στην περίπτωση δοκιμής διαρροής με Δ.Υ. ή σε έλεγχο πλαστικών υλικών).

Απαιτείται προσοχή στο περιεχόμενο του διείδυτή σε Θείο (S), Αλογόνα (Cl, F) και αλκαλικές ουσίες (αλλά και όλων των υγρών που έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο, όπως υγρά προ- και μετά- καθαρισμού, γαλακτωματοποιητές και εμφανιστές).

Τα κράματα του αλουμινίου μπορούν να παρουσιάσουν διάβρωση (ιδιαίτερα τρηματική - pitting), όταν έλθουν σε (συνεχή) επαφή με αλκάλια, ενώ ορισμένα κράματα (ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες, Νικελίου, Τιτανίου κ.ά.) να παρουσιάσουν διάβρωση όταν έλθουν σε επαφή (συνεχή) με Θείο και Αλογόνα.

#### **4.5.3 Αφαίρεση του Επιφανειακού Διείδυτή - Ξήρανση**

Μετά το τέλος του χρόνου διείδυσης ξεκινά η διαδικασία αφαίρεσης του πλεονάζοντος επιφανειακού διείδυτή.



Όπως αναφέραμε, η συντριπτική πλειοψηφία των διεισδυτών είναι ελαιώδους βάσεως και επομένως η αφαίρεση τους γίνεται είτε με διαλύτη είτε με απορρυπαντικά (γαλακτωματοποιητές ή σάπωνες).

Οι σάπωνες είναι άλατα νατρίου λιπαρών οξέων και δεν χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Δ.Υ. Οι γαλακτωματοποιητές (αλλά και οι σάπωνες) είναι ουσίες με το ένα μέρος του μορίου τους ελαιοδιαλυτό και το άλλο υδατοδιαλυτό. Έτσι τα έλαια/λίπη διαλύονται στο κατάλληλο τμήμα του μορίου, ενώ το υπόλοιπο τμήμα διαλύεται στο νερό, άρα «ξεπλένοντας» με νερό απομακρύνουμε και τα λάδια / διεισδυτές της επιφάνειας.

Μετά την αφαίρεση του πλεονάζοντος διεισδυτή ακολουθεί στέγνωμα / ξήρανση της επιφάνειας, διότι ο εμφανιστής πρέπει να εφαρμοστεί σε ξηρή επιφάνεια (εξαίρεση αποτελεί ο συνδυασμός υγρού υδατικού εμφανιστή και υδατοαφαιρούμενου διεισδυτή).

Γενικά, από άποψη αφαίρεσης πλεονάζοντος διεισδυτή, έχουμε τρεις μεθόδους: Αφαίρεση με διαλύτη, αφαίρεση με νερό και μεταγαλακτωματοποίηση.

#### *4.5.3.1 Αφαίρεση με διαλύτη*

Καθαρίζουμε την επιφάνεια με στεγνά και καθαρά ράκη ή χαρτί (που δεν αφήνουν χνούδι) και κατόπιν με ράκη/χαρτί ελαφρά νοτισμένο με διαλύτη. Σκουπίζουμε με πίεση (προς μια κατεύθυνση πάντα, για ευκολότερη αφαίρεση) έως ότου δεν μείνει ίχνος διεισδυτή στο πανί/χαρτί. Για φθορίζοντες διεισδυτές, ο έλεγχος αυτός γίνεται σε σκοτεινό θάλαμο και κάτω από λάμπα μαύρου φωτός.

Γενικά απαγορεύεται ο ψεκασμός με διαλύτη απευθείας στην επιφάνεια, διότι μειώνει έως μηδενίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, αφαιρώντας τον διεισδυτή από τα χείλη της ασυνέχειας και εμποδίζοντας την εξόγκηση, στο επόμενο στάδιο.

Η ξήρανση επιτυγχάνεται στον αέρα του περιβάλλοντος και βοηθείται με λίγο φύσημα ή ρεύμα θερμού αέρα.

#### *4.5.3.2 Υδατοαφαιρούμενοι διεισδυτές*

Εάν στο ελαιώδες μίγμα διεισδυτή προστεθεί από τον κατασκευαστή γαλακτωματοποιητής, τότε έχουμε την περίπτωση του υδατοαφαιρούμενου διεισδυτή. Η αφαίρεση γίνεται με ευρύ ρεύμα νερού όχι μεγάλης πίεσης ( 2 έως 3 bar το πολύ),

υπό γωνία προς την επιφάνεια και σε απόσταση μεγαλύτερη των 30 cm από αυτήν. Η θερμοκρασία του νερού συνιστάται να είναι μεταξύ 15° C και 30°C. Η αφαίρεση του φθορίζοντος διεισδυτή γίνεται σε σκοτεινό θάλαμο και κάτω από μαύρο φως.

Το επόμενο απαραίτητο στάδιο είναι η ξήρανση του δοκιμίου, που γίνεται είτε με ρεύμα θερμού αέρα είτε μέσα σε κλίβανο (και θερμοκρασία ανάλογη με την προδιαγραφή και κατά προτίμηση με κινούμενο ρεύμα αέρα). Γενικά συνιστάται η θερμοκρασία της επιφάνειας του δοκιμίου να μην υπερβεί τους 50°C και ο χρόνος ξήρανσης να μην υπερβεί τα 10 min.

Στην περίπτωση υδατοαφαιρούμενου διεισδυτή και υγρού υδατικού εμφανιστή, η ξήρανση δεν γίνεται πριν την εφαρμογή του εμφανιστή αλλά μετά από αυτήν.

#### 4.5.3.3 *Μετα-γαλακτωματοποιούμενοι διεισδυτές*

Πρόκειται για την πιο σύγχρονη μέθοδο Δ.Υ., που αναπτύχθηκε λόγω της ανάγκης ανίχνευσης επιφανειακών ασυνεχειών με πλατειά χείλη είτε εξαιρετικά αβαθών (όπως π.χ. τα ρήγματα κοπώσεως στο ξεκίνημα τους) Συνήθως συνδυάζεται με φθορίζοντα διεισδυτή παρά με ορατό.

Οι γαλακτωματοποιητές είναι δύο κατηγοριών: **Λιπόφιλοι** (lipophilic) και **Υδρόφιλοι** (Hydrophilic). Οι λιπόφιλοι δεν ανέχονται νερό περισσότερο από 5%, δρουν με διάχυση μέσα στον επιφανειακό διεισδυτή και εφαρμόζονται με βύθιση ή ψεκασμό (για πολύ μικρό χρόνο, 0,5 έως 3 λεπτά). Ο χρόνος εφαρμογής του λιπόφιλου γαλακτωματοποιητή είναι εξαιρετικά κρίσιμος και ο βέλτιστος βρίσκεται μόνο με πείραμα. Οι γαλακτωματοποιητές φθορίζουν ελαφρά σε πορτοκαλί χρώμα, κάτω από το μαύρο φως, για να μπορούν να διακριθούν από τους διεισδυτές.

Οι υδρόφιλοι γαλακτωματοποιητές δρουν επιφανειακά είτε ως απορρυπαντικά, ανέχονται απεριόριστη ποσότητα νερού και εφαρμόζονται (με βύθιση ή ψεκασμό) για μεγαλύτερο χρόνο (5 έως 20 λεπτά). Ο βέλτιστος χρόνος βρίσκεται και πάλι με πειράματα, αλλά δεν είναι τόσο πολύ κρίσιμος όσο στην περίπτωση λιπόφιλων γαλακτωματοποιητών. Σήμερα, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων των υδρόφιλων, χρησιμοποιούνται στην πράξη σχεδόν αποκλειστικά, συχνά με ψεκασμό μαζί με μεγάλη ποσότητα νερού (scrubber).

Μετά την εφαρμογή του γαλακτωματοποιητή, αφαιρείται ο πλεονάζων διεισδυτής με ρεύμα νερού, όπως στην περίπτωση του υδατοαφαιρούμενου διεισδυτή και ακολουθεί ξήρανση του δοκιμίου, κατά τα προηγούμενα.

#### 4.5.4 Εφαρμογή Εμφανιστή - Ξήρανση – Εξόλκηση

Μόλις το δοκίμιο ξηρανθεί, είναι πολύ πιθανό η εξόλκηση να γίνει αυτόματα και να έχουμε τις πρώτες ενδείξεις (ιδιαίτερα στην περίπτωση φθοριζόντων διεισδυτών) Συχνά μάλιστα, απλά θερμαίνοντας το δοκίμιο, έχουμε αρκετά καλή εξόλκηση.

Είναι όμως πάντοτε απαραίτητο να εφαρμόζουμε εμφανιστή (developer), για τον έλεγχο της εξόλκησης και για τους εξής λόγους:

α. Ο εμφανιστής ανασύρει μεγάλο μέρος του διεισδυτή από την ασυνέχεια, μέσω του αντίστροφου τριχοειδούς φαινομένου.

β. «Απλώνει» την ασυνέχεια κατά πλάτος, κάνοντας την πιο εύκολα ορατή.

γ. Αυξάνει την ένταση της φωτεινότητας της ένδειξης (στα φθορίζοντα διεισδυτικά), λόγω των πολλαπλών στρωμάτων σκόνης που παρέχει.

δ. Προσφέρει χρωματική αντίθεση (στα ορατά διεισδυτικά).

ε. Εάν ο εμφανιστής περιέχει διαλύτη, βοηθά ακόμη περισσότερο την εξόλκηση (περίπτωση υγρού μη υδατικού εμφανιστή και πλαστικού φιλμ). Λόγω ελάττωσης του ιξώδους και αύξησης του όγκου του διεισδυτή που έρχεται σε επαφή με τον διαλύτη, βοηθάται η αυτόματη εξόλκηση.

Οι εμφανιστές είναι **ξηροί** (ξηρές σκόνες), **υγροί υδατικοί** (αιώρημα ή διάλυμα σε νερό), **υγροί μη υδατικοί** (αιώρημα σε διαλύτη) και τύπου **πλαστικού φιλμ**. Το στερεό μέρος του εμφανιστή αρχικά ήταν σκόνη κιμωλίας είτε ταλκ, σήμερα όμως αποτελείται από διάφορα συστατικά, μεταξύ των οποίων και άμορφα πυριτικά άλατα.

Οι ξηροί εμφανιστές είναι οι λιγότερο ευαίσθητοι αλλά βρίσκουν εξαιρετική χρήση στην περίπτωση τραχιάς επιφάνειας (χυτά ή σπειρώματα), όπου οι υγροί εμφανιστές μπορεί να «λιμνάσουν». Οι υγροί υδατικοί χρησιμοποιούνται σπάνια, καθώς έχουν εκτοπιστεί από τους μη υδατικούς. Οι υγροί μη υδατικοί (τα συνήθη σπρέι) δίνουν την καλύτερη ευαισθησία (λόγω της επιπλέον εξόλκησης από τον διαλύτη) και εφαρμόζονται πάντοτε με σπρέι, αφού αναδευτούν πολύ καλά.

Στην περίπτωση υγρού μη υδατικού εμφανιστή, συνιστάται η εφαρμογή του σε επάλληλα λεπτά στρώματα (αφήνοντας χρόνο για να στεγνώσει το προηγούμενο). Ο ψεκασμός πρέπει να γίνεται από μακριά (τουλάχιστον 30 cm) και αφού το δοκίμιο έχει κρυώσει. Στην περίπτωση των υγρών υδατικών εμφανιστών ακολουθεί ξήρανση, κατά τα προηγούμενα, ενώ για τους υγρούς μη υδατικούς αρκεί να περιμένουμε λίγο ή να φυσήξουμε ελαφρά ή ακόμα καλύτερα να στεγνώσουμε με ελαφρό ρεύμα θερμού αέρα.

Παλαιά υπήρχε η σύσταση για χρόνο εμφάνισης περίπου το μισό του χρόνου διείσδυσης. Σήμερα όμως αρκεί μισό έως ένα λεπτό, για ικανοποιητική εμφάνιση, και σπάνια απαιτείται μεγαλύτερος.

#### **4.5.5 Παρατήρηση των ενδείξεων – Καταγραφή**

Στην περίπτωση ασυνεχειών μεγάλου όγκου ή στην περίπτωση μεγάλων χρόνων διείσδυσης, οι ενδείξεις σχηματίζονται πολύ γρήγορα αλλά και χαλούν γρήγορα (απλώνοντας). Είναι καλή τεχνική να σκουπίζουμε αμέσως το πρώτο στρώμα (ξηραμένου) εμφανιστή και να απλώνουμε το δεύτερο. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί ορισμένες φορές, έως ότου πάρουμε ενδείξεις απόλυτα αντιπροσωπευτικές της ασυνέχειας (ιδιαίτερα μάλιστα εάν υποψιαζόμαστε ότι οι ενδείξεις είναι ψευδείς ή μη σχετικές). Χρειάζεται όμως προσοχή στην περίπτωση μικρών/αβαθών ασυνεχειών, για να μη χαθούν τελείως.

Προκειμένου να σχηματίσουμε άποψη για το βάθος (όγκο μάλλον) μιας ασυνέχειας, μια άλλη τεχνική είναι η εφαρμογή επάλληλων στρωμάτων, χωρίς να σκουπιστεί το προηγούμενο. Οι ασυνέχειες μεγάλου όγκου θα συνεχίσουν να φαίνονται, ενώ οι μικρές γρήγορα θα χαθούν (το ίδιο και οι ψευδείς ή μη σχετικές).

Η παρατήρηση των ενδείξεων γίνεται άμεσα, με την εφαρμογή του εμφανιστή (και μετά την ξήρανση του). Κανένα επιπλέον στρώμα δεν τοποθετείται εάν δεν δούμε τις ενδείξεις στο προηγούμενο του.

Μπορούμε να επιτύχουμε καταγραφή των ενδείξεων με τους εξής τρόπους:

α. Με κατάλληλο σχέδιο/σκίτσο. Απαιτείται η θέση και οι διαστάσεις τους, καθώς αυτά τα δύο θα καθορίσουν την αποδοχή ή την απόρριψη του δοκιμίου, βάσει της χρησιμοποιούμενης προδιαγραφής αποδοχής-απόρριψης.

β. Με φωτογράφιση (έγχρωμη είτε ασπρόμαυρη). Απαιτείται ειδική τεχνική και φιλμ, ιδιαίτερα μάλιστα για φθορίζοντες διεισδυτές.

γ. Με χρήση εμφανιστή τύπου πλαστικού φιλμ (plastic film developer). Έχει εξαιρετες ιδιότητες εξόγκησης, λόγω της δράσης του διαλύτη που περιέχει. Επίσης δεν επιτρέπει τη διάχυση της ένδειξης στην επιφάνεια και επομένως δίνει εξαιρετικά ευκρινή εικόνα της ασυνέχειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλά σαν εμφανιστής υψηλής απόδοσης-ευαισθησίας είτε, με ειδική τεχνική, ώστε να δημιουργηθεί ένα στερεό φιλμ που αποκολλάται από το δοκίμιο, φέροντας επάνω του την ένδειξη.

δ. Με ψεκασμό ειδικού «στερεωτή» πάνω στην ένδειξη και κατόπιν αποκόλληση της ένδειξης, χρησιμοποιώντας διαφανή κολλητική ταινία.

ε. Με άλλες, πολύ εξειδικευμένες τεχνικές, όπως με χρήση σιλικόνης για εσωτερικά σπειρώματα.

#### **4.5.6 Μετα-καθαρισμός**

Πρόκειται ουσιαστικά για τις ίδιες διεργασίες με τον προ-καθαρισμό, αφού σκουπίσουμε και ξεπλύνουμε με νερό ή διαλύτη το στρώμα εμφανιστή. Και πάλι η μέθοδος απολίπανσης με ατμό (vapor degreasing) είναι η πλέον αποτελεσματική, ιδιαίτερα εάν πρόκειται να ξαναελέγξουμε το δοκίμιο με Διεισδυτικά Υγρά.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι επαναληπτικός έλεγχος, αφού βεβαίως προηγηθεί μετα-καθαρισμός, δεν μπορεί να δώσει την ίδια ευαισθησία με τον πρώτο έλεγχο, διότι αναπόφευκτα θα παραμείνουν ίχνη διεισδυτή στην ασυνέχεια. Αν επιθυμούμε επανάληψη υψηλής ευαισθησίας, συνιστάται θέρμανση του δοκιμίου (αν επιτρέπεται από τον κατασκευαστή) σε κλίβανο θερμοκρασίας άνω των 100°C, αφού προηγηθεί πολύ καλός καθαρισμός.

### **4.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΕΝΔΕΙΞΕΩΝ**

Στη μέθοδο Δ. Υ. η ερμηνεία έχει δύο στάδια:

α) Την απόφαση για το εάν η ένδειξη είναι αληθής ή ψευδής, σχετική ή μη σχετική.

β) Τη συσχέτιση της ένδειξης με την πραγματική ασυνέχεια (π.χ. ρήγμα, πόρος, επιφανειακή ατελής τήξη κ.λπ.). Για πολλές προδιαγραφές αποδοχής-απόρριψης αρκεί μόνο να χαρακτηριστεί η ένδειξη σαν γραμμική ή στρογγυλόμορφη, παρά να προσδιοριστεί ακριβώς η φύση της ασυνέχειας. Γραμμική θεωρείται η ένδειξη της οποίας η μία διάσταση είναι μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της άλλης.

#### **4.6.1 Ψευδείς Ενδείξεις**

Πρόκειται για ενδείξεις που δεν έχουν σχέση με το τριχοειδές φαινόμενο, ουσιαστικά δηλαδή για ύπαρξη επιφανειακού διεισδυτή, είτε λόγω κακού προκαθαρισμού (που επέτρεψε στη συνέχεια τον εγκλωβισμό διεισδυτή στην

επιφάνεια) είτε κυρίως για κακή αφαίρεση του πλεονάζοντος διεισδυτή. Εάν το υπόβαθρο ψευδών ενδείξεων είναι ισχυρό (έστω και τοπικά), μπορεί να σκεπάσει αληθείς ενδείξεις και άρα επιβάλλεται μετα-καθαρισμός και επανάληψη του ελέγχου από την αρχή.

Όπως και προηγουμένως επισημίναμε, η πρώτη φορά είναι και η πιο ευαίσθητη, όσον αφορά τα Δ.Υ., διότι δεν είναι δυνατόν να καθαριστεί πλήρως η τυχόν ασυνέχεια από όλα τα κατάλοιπα της μεθόδου και άρα η επόμενη διείσδυση δεν θα είναι τόσο επιτυχής. Γι' αυτό και πρέπει να αποφεύγονται οι ψευδείς ενδείξεις, με καλό προ-καθαρισμό και καλή αφαίρεση του πλεονάζοντος διεισδυτή.

Από την άλλη πλευρά, πολλές φορές (ιδιαίτερα στη μεταγαλακτωματοποίηση ή στα φθορίζοντα διεισδυτικά) επιθυμούμε ένα πολύ ελαφρό υπόβαθρο ένδειξης επιφανειακού διεισδυτή, για να σιγουρευτούμε ότι δεν έχουμε κάνει υπερβολική έκπλυση διεισδυτή (άρα δεν αφαιρέσαμε διεισδυτή από την ασυνέχεια).

#### **4.6.2 Αληθείς Ενδείξεις**

Πρόκειται για ενδείξεις που οφείλονται στο τριχοειδές φαινόμενο και την εξόλκηση διεισδυτή. Χωρίζονται σε μη σχετικές και σε σχετικές.

#### **4.6.3 Μη σχετικές Αληθείς Ενδείξεις**

Πρόκειται για ενδείξεις προερχόμενες από γνωστά αίτια (π.χ. σπειρώματα, σφηνοδρόμους, αλλαγές διατομής κ.λπ.). Δεν αξιολογούνται αλλά δεν πρέπει να είναι τόσο έντονες που να μπορούν να σκεπάσουν σχετικές ενδείξεις.

#### **4.6.4 Σχετικές Αληθείς Ενδείξεις**

Πρόκειται για ενδείξεις από άγνωστες, μη αναμενόμενες περιπτώσεις τριχοειδούς φαινομένου (και εξόλκησης), άρα προερχόμενες από ασυνέχειες (ατέλειες) του δοκιμίου.

Εφαρμόζοντας τα κριτήρια της χρησιμοποιούμενης προδιαγραφής αποδοχής-απόρριψης (που θα μας δώσει ο πελάτης ή ο Level 3 για λογαριασμό του πελάτη) θα απορρίψουμε το δοκίμιο, θα ζητήσουμε επισκευή και επανέλεγχο ή θα το δεχθούμε όπως είναι.

Τα εφαρμοζόμενα κριτήρια αποδοχής-απόρριψης έχουν να κάνουν με τη μελλοντική χρήση του δοκιμίου, τα φορτία που θα δεχθεί, το περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθεί, την κρισιμότητα της ασυνέχειας για το δοκίμιο, την κρισιμότητα του δοκιμίου για την ασφάλεια και καλή λειτουργία του όλου συγκροτήματος που θα τοποθετηθεί και πολλά άλλα. Σε καμία λοιπόν περίπτωση δεν πρέπει να υπάρξουν αυθαίρετες εκτιμήσεις από την πλευρά του ελεγκτή και το μόνο αποδεκτό είναι η τήρηση της προδιαγραφής αποδοχής-απόρριψης. Εξάλλου, και σε αυτή την περίπτωση ισχύει το γνωστό **«όταν μιλούν οι προδιαγραφές, οι έξυπνοι σιωπούν»**.

#### **4.7 ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Δ.Υ.**

Η δοκιμή διαρροής με χρήση Δ.Υ. (leak trough) γίνεται εφαρμόζοντας διεισδυτή στην μία πλευρά του δοκιμίου και ενδεχόμενα εμφανιστή στην άλλη πλευρά. Χρησιμοποιείται συχνά σε δοχεία, σωληνώσεις, κοίλα μέρη μεγάλων χυτών κ.λπ. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ειδικές βαφές, σε μορφή υδατοδιαλυτής σκόνης, συνήθως φθορίζουσες (σε κόκκινο ή κίτρινο χρώμα, κάτω από το μαύρο φως). Συνήθως εφαρμόζονται μεγάλοι χρόνοι διείσδυσης. Απαιτείται προσοχή στη συμβατότητα των Δ.Υ. όχι μόνο σε σχέση με τα εξεταζόμενα υλικά αλλά και σε σχέση με το περιεχόμενο που αυτά θα φέρουν κατά τη χρήση τους.

#### **4.8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΓΡΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (LOX)**

Υλικά και συστήματα που θα έρθουν σε επαφή με υγρό οξυγόνο (Liquid Oxygen-LOX) πρέπει να εξετάζονται μόνο με ειδικώς εγκεκριμένα υλικά Δ.Υ., λόγω της δυνατότητας έκρηξης, όταν το υγρό οξυγόνο έρθει σε επαφή με κατάλοιπα της μεθόδου. Ο διεισδυτής είναι υδατικής βάσης με ελάχιστα οργανικά στοιχεία. Επίσης ακολουθείται ιδιαίτερη διαδικασία μετακαθαρισμού.

#### **4.9 ΟΡΑΤΕΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΙΖΟΥΣΕΣ ΒΑΦΕΣ**

Οι βαφές που περιέχει ο διεισδυτής μπορεί να είναι άμεσα ορατές είτε φθορίζουσες. Σε κάθε περίπτωση, η ικανότητα του ανθρώπινου ματιού να εντοπίσει την ύπαρξη ένδειξης, εξαρτάται και από το λόγο αντίθεσης (contrast ratio) της ένδειξης και του υποβάθρου της. Στην περίπτωση αντίθεσης μαύρου-άσπρου (π.χ. ορατά

μαγνητικά σωματίδια) ο λόγος αντίθεσης είναι πρακτικά της τάξης του 9:1, ενώ για αντίθεση κόκκινου-άσπρου (π.χ. συνήθη ορατά διεισδυτικά) της τάξης του 6:1. Πρακτικά, στην περίπτωση φθορίζοντων διεισδυτικών, ο λόγος αντίθεσης εύκολα φτάνει την τιμή 300:1 και τιμές 1000:1 είναι επίσης εφικτές. Θεωρητικά, ο λόγος ορατής αντίθεσης δε μπορεί να ξεπεράσει το 33:1, ενώ επίσης θεωρητικά, στην περίπτωση φθορίζοντος αντικειμένου-μαύρου υποβάθρου, είναι άπειρος.

Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η μέθοδος με φθορίζοντα διεισδυτικά είναι περισσότερο ευαίσθητη από τη μέθοδο ορατών Δ.Υ., απλά διότι αυξάνεται η ικανότητα αντίληψης της ένδειξης

Άλλος λόγος είναι ότι, σε άπλετο φως, το ανθρώπινο μάτι διακρίνει μεν πολύ καλά χρωματικές διαφορές αλλά δεν διακρίνει μικρές πηγές φωτός. Τα πράγματα αντιστρέφονται στην περίπτωση σκοταδιού. Μάλιστα, λόγω του φαινομένου που καλείται στα αγγλικά halation, μικρές πηγές φωτός σε σκοτεινό περιβάλλον φαίνονται μεγαλύτερες από ό,τι πραγματικά είναι (και άρα εντοπίζονται ευκολότερα). Επίσης, σε συνθήκες σκότους, το μάτι αυτόματα οδηγείται σε υπάρχουσες πηγές φωτός Έτσι, και πάλι η φθορίζουσα βαφή είναι πιο «ευαίσθητη», απλά διότι δημιουργεί ένδειξη ευκολότερα αντιληπτή. Εξ άλλου, το ανθρώπινο μάτι είναι ικανό να διακρίνει διαφορά φωτεινότητας της τάξης του 10-15%. Γενικά, σε συνθήκες φωτός το ανθρώπινο μάτι βλέπει μέσω των «κωνίων» (cones), ενώ σε συνθήκες σκοταδιού μέσω των «ραβδίων» (rods), τα οποία είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητα.

#### **4.9.1 Παρατήρηση Ενδείξεων Ορατών Δ.Υ.**

Χρειάζεται άπλετο και διάχυτο φως, έντασης τουλάχιστον 350 lux (32,5 footcandles). Σημειώνεται ότι ορισμένες προδιαγραφές απαιτούν πολύ μεγαλύτερες εντάσεις, της τάξεως των 1000 lux.

#### **4.9.2 Το μαύρο φως**

Το ορατό φως έχει μήκη κύματος μεταξύ 400 και 700 nm (4000 έως 7000 Angstrom). Σε μικρότερα μήκη κύματος (100 έως 400 nm) βρίσκεται το υπεριώδες φως (ultraviolet).

Το υπεριώδες χωρίζεται σε τρεις ζώνες : UV-A(315-400nm), UV-B (280-315nm) και UV-C(100-280nm). Το τμήμα UV-A ονομάζεται και «μαύρο φως» (black light).



Ενώ τα τμήματα UV-B και UV-C θεωρούνται βλαπτικά για τους ζωντανούς ιστούς και οργανισμούς, το μαύρο φως θεωρείται ακίνδυνο, ακόμα και με άμεση όραση.

#### **4.9.3 Φθορίζουσες Βαφές**

Φθορισμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό απορροφά ενέργεια (συνήθως φως) κάποιου μήκους κύματος και ταυτόχρονα εκπέμπει φως διαφορετικού μήκους κύματος (κατά το φωσφορισμό η εκπομπή συνεχίζει και μετά την απορρόφηση).

Οι φθορίζουσες βαφές των Δ.Υ. απορροφούν μαύρο φως μήκους κύματος 350-400nm , με μέγιστη απόδοση στα 365 nm, όπου και η μέγιστη απόδοση του φίλτρου της λάμπας. Εκπέμπουν φως μήκους κύματος 475 – 575 nm , δηλαδή κίτρινο-πράσινο. Το χρώμα αυτό έχει το πλεονέκτημα αφενός να μη συγχέεται με το φυσικό χρώμα φθορισμού οργανικών ουσιών (περίπου μπλε) και αφετέρου είναι εξαιρετικά εύκολα ορατό για το ανθρώπινο μάτι, ακόμη και σε πολύ μικρή ένταση. Σε περίπτωση πολύ λεπτών ασυνεχειών (π.χ. ρήγματα κοπώσεως) όπου οι κίτρινες χρωστικές δεν μπορούν να εισχωρήσουν, η ένδειξη έχει χρώμα προς το πράσινο (η σχετική βαφή διεισδύει ευκολότερα).

Γενικά, χρησιμοποιείται μίγμα βαφών, άλλες από τις οποίες είναι ενεργοποιητές (activators, δηλ. απορροφούν το μαύρο φως εκπέμποντας άλλα μήκη κύματος) και άλλες δίδουν το επιθυμητό χρώμα (color forming), απορροφώντας και το φως των ενεργοποιητών και εκπέμποντας στο κίτρινο-πράσινο). Ο συνδυασμός αυτών των βαφών λέγεται cascading. Εάν η παρατήρηση δεν γίνεται με το μάτι αλλά με ειδικούς φωτοπολλαπλασιαστές, ενδέχεται το επιθυμητό χρώμα εκπομπής να είναι διαφορετικό.

#### **4.9.4 Παρατήρηση Ενδείξεων Φθοριζόντων Δ.Υ.**

Γενικά συνιστάται πολύ χαμηλός φωτισμός περιβάλλοντος (10-32 lux, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη προδιαγραφή). Το απόλυτο σκοτάδι, αν και επιθυμητό από άποψη ελέγχου, πρέπει να αποφεύγεται για λόγους ασφαλείας.

Η ένταση του μαύρου φωτός πάνω στο δοκίμιο πρέπει να ελέγχεται. Οι προδιαγραφές απαιτούν ένταση τουλάχιστον  $800 \text{ Mw/cm}^2$  (συνήθως 1000), συχνά 1500 και ενίοτε  $3000 \mu\text{W/cm}^2$ .

Συνιστάται παραμονή στο σκοτεινό θάλαμο τουλάχιστον 5 λεπτών, πριν αρχίσει ο έλεγχος, ώστε να υπάρξει προσαρμογή των ματιών στις συνθήκες σκότους. Συνιστάται επίσης η χρήση γυαλιών που απορροφούν το μαύρο φως (π.χ. sodium type), για να μη κουράζονται τα μάτια και να βελτιώνονται οι συνθήκες όρασης. Πρέπει επίσης να αποφεύγουμε τα άσπρα ρούχα (ιδίως πουκάμισα), διότι συνήθως τα απορρυπαντικά περιέχουν και φθορίζουσες βαφές στην περιοχή του μπλε (για επίπλαστη αίσθηση καθαρότητας, λόγω φθορισμού από το υπεριώδες φως του ήλιου και των λαμπτήρων).

Εάν κοιτάζουμε απευθείας τη λάμπα μαύρου φωτός, ενδέχεται να «βλέπουμε» φωτεινά σημάδια αλλά και να φαίνονται τα μάτια μας «φωτεινά» από τους παρευρισκόμενους (λόγω φθορισμού ουσιών μέσα στο μάτι). Το φαινόμενο είναι αβλαβές και προσωρινό, μπορεί όμως να φέρει αμηχανία και παροδικά ομιχλώδη όραση στον παθόντα.

Είναι εξαιρετικά σημαντικό να μη επιμολυνθεί το δοκίμιο με ορατό διεισδυτή, διότι τότε ο φθορίζων διεισδυτής χάνει την ικανότητα φθορισμού.

Κατά την παρατήρηση, πρέπει να έχουμε πάντα υπόψη μας ότι ένδειξη αποτελεί όχι ό,τι απλώς φαίνεται, αλλά ό,τι μας δίνει την αίσθηση πως ακτινοβολεί. Σημειώνουμε ακόμα πως η μέθοδος φθορίζοντων Διεισδυτικών Υγρών απαιτεί αφενός πολύ καλή αφαίρεση του επιφανειακού διεισδυτή (στο σκοτεινό θάλαμο και με μαύρο φως) και αφετέρου ελάχιστο στρώμα εμφανιστή (ειδάλλως θα υπάρχει ένα πολύ ισχυρό φθορίζον υπόβαθρο). Είναι καλή τεχνική να ρίχνουμε ένα λεπτό στρώμα εμφανιστή, να σκουπίζουμε προσεκτικά το δοκίμιο με καθαρό πανί/χαρτί (πάντα προς μία κατεύθυνση και εξασκώντας ισχυρή πίεση) και κατόπιν να τοποθετούμε τη λάμπα κοντά στο δοκίμιο και να παρατηρούμε (η εκπεμπόμενη θερμότητα θα βοηθήσει την εξόλκηση).

Σημειώνουμε επίσης ότι φθορίζοντες διεισδυτές δεν πρέπει να παραμένουν σε διαφανή δοχεία έκθετοι στο φως του ήλιου, διότι χάνουν την ικανότητα φθορισμού. Ομοίως δεν πρέπει να τοποθετούνται κοντά σε πηγές θερμότητας και βέβαια να επιμολύνονται με ορατούς διεισδυτές ή όξινα συστατικά ή χρωμικά.

#### 4.9.5 Λάμπες Μαύρου Φωτός

Λάμπες μαύρου φωτός υπάρχουν είτε πυρακτώσεως (incandescent) είτε σωληνοειδείς (όπως οι λάμπες φθορισμού) είτε Ατμών Υδραργύρου. Οι δύο πρώτες κατηγορίες δίνουν μικρές εντάσεις και μόνο βοηθητικά ή πολλές μαζί μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ας σημειωθεί ότι οι συνήθεις τύπου πυρακτώσεως πρέπει να τοποθετούνται οριζόντια και όχι κάθετα (όπως οι κοινές λάμπες πυρακτώσεως), διότι εκπέμπουν από το πλάι τους. Και αυτές επίσης έχουν ιδιαίτερο τρόπο έναυσης, οπότε σβήσιμο της λάμπας (επίτηδες είτε λόγω αύξησης της θερμοκρασίας) σημαίνει αναμονή λίγων λεπτών, προκειμένου να αποκατασταθεί το φως.

Οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες λάμπες μαύρου φωτός είναι αυτές των Ατμών Υδραργύρου. Παράγουν υπεριώδες αλλά και ορατό φως, της τάξης των 300 – 670nm, με μέγιστη ένταση στα 365nm. Το φίλτρο όμως που φέρουν απορροφά τα μικρά μήκη κύματος καθώς και το περισσότερο ορατό και αφήνει μόνο μήκη κύματος 300 - 400 nm(δηλαδή μαύρο φως αλλά και ελάχιστο ορατό ιώδες).

Για λόγους ασφαλείας, το φίλτρο πρέπει να ελέγχεται τακτικά για πιθανά γδαρσίματα, και βεβαίως να μη χρησιμοποιείται αν ραγίσει ή σπάσει. Για λόγους απόδοσης, το φίλτρο πρέπει να καθαρίζεται τακτικά από σκόνης είτε άλλους ρύπους, και ιδίως από ίχνη εμφανιστή.

Η ακτινοβολία μέγιστης έντασης που περνά από το φίλτρο παρουσιάζεται στα 365 nm, δηλαδή εκεί που είναι και η μέγιστη ένταση παραγωγής φωτός αλλά και το σημείο ενεργοποίησης των φθοριζόντων βαφών.

Το τόξο υδραργύρου δημιουργείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε κρυστάλλινη κάψα γεμάτη με αέριο Νέον, όπου υπάρχει και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο για την έναυση του τόξου, μέσω θέρμανσης και εξάτμισης του υδραργύρου. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με ρεύμα μέσω ηλεκτρικής αντίστασης.

Το όλο σύστημα τροφοδοτείται από μετασχηματιστή, ώστε να περιορίζεται η τιμή της έντασης του ρεύματος στα βασικά ηλεκτρόδια.

Η κάψα με τα προαναφερθέντα τρία ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένη σε γυάλινο περίβλημα. Το εμπρόσθιο μέρος του περιβλήματος έχει κατάλληλη κυρτότητα, ώστε να εστιάζεται το φως της λάμπας.

Η επιλογή του εκπεμπόμενου φάσματος γίνεται κύρια μέσω κατασκευαστικής ρύθμισης της πίεσης στην εσωτερική κρυστάλλινη κάψα. Υψηλή πίεση (100 atm)

δίνει συνεχές φάσμα, ενώ μέση πίεση (1-10 atm) δίνει το σωστό φάσμα φωτός, δηλ. υπεριώδεις και κυρίως μαύρο φως. Γι' αυτό το λόγο οι πλέον χρησιμοποιούμενες λάμπες είναι μέσης πίεσης (συνήθως 10 atm ). Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες λάμπες Ατμών Υδραργύρου είναι τύπου Spot 100 Watt.

Εάν υπερθερμανθεί, η λάμπα σβήνει (γι' αυτό και συνιστάται αφαίρεση του φίλτρου και καθαρισμός τόσο του φίλτρου όσο και της λάμπας). Κάθε σβήσιμο της λάμπας (επίτηδες είτε λόγω υπερθέρμανσης) έχει μεγάλες συνέπειες στη διάρκεια ζωής της, καθώς για κάθε άναμμα καταναλώνεται υλικό των ηλεκτροδίων. Επίσης, υψηλή τάση δικτύου μπορεί να φέρει μεγάλη ελάττωση της ζωής της λάμπας. Χαμηλή τάση θα έχει συνέπεια το σβήσιμο της.

Μία λάμπα, από τη στιγμή που ανάψει, χρειάζεται πέντε τουλάχιστον λεπτά για να φθάσει στην πλήρη απόδοση της. Εάν σβύσει, τότε χρειάζεται τουλάχιστον 10 λεπτά, για να έχει πάλι πλήρη απόδοση. Αυτός είναι και ένας άλλος λόγος για τον οποίο δε σβύνουμε τη λάμπα, παρά μόνο στο τέλος της εργασίας.

Πρόσφατα κυκλοφόρησαν στο εμπόριο λάμπες μαύρου φωτός οι οποίες φθάνουν στη μέγιστη απόδοση τους πάρα πολύ γρήγορα μετά το άναμμα, ακόμη και αν τις σβύσαμε μόλις προηγουμένως.

#### **4.10. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ**

##### **4.10.1 Κατά MIL-I-25135**

GROUP I - Διαλυτοαφαιρούμενα Ορατά

GROUP II - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα Ορατά

GROUP III - Υδατοαφαιρούμενα Ορατά

GROUP IV - Υδατοαφαιρούμενα φθορίζοντα (χαμηλής ευαισθησίας)

Όλα τα ανωτέρω έχουν την ίδια περίπου ευαισθησία και η διαφορά βρίσκεται μόνο στη σωστή τεχνική και στον εμφανιστή.

GROUP V - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα φθορίζοντα (μέσης ευαισθησίας)

GROUP VI - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα φθορίζοντα (υψηλής ευαισθησίας)

GROUP VII - Διαλυτοαφαιρούμενα φθορίζοντα (υψηλής ευαισθησίας) και υγρός μη υδατικός εμφανιστής (kit)

Σημειώνουμε και πάλι ότι η καλή τεχνική και η χρήση πιο ευαίσθητου εμφανιστή μπορεί να βελτιώσει σημαντικά μία μέθοδο.

#### **4.10.2 Κατά MIL-I-6866**

Τύπος I - Φθορίζοντα

Μέθοδος A - Υδατοαφαιρούμενα (GROUP IV)

B - Μετα-γαλαχτοϋματοποιούμενα (GROUP V και VI)

C - Διαλυτοαφαιρούμενα (GROUP VII)

Τύπος II - Ορατά

Μέθοδος A - Υδατοαφαιρούμενα (GROUP III )

B - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα (GROUP II)

C - Διαλυτοαφαιρούμενα (GROUP I)

#### **4.10.3 Κατά ASTM E-165 έκδοση 1991**

(Ομοίως κατά ASME V, άρθρο 24, SE-165 έκδοση 1991)

Μέθοδος A: Φθορίζοντα

Τύπος 1 : Υδατοαφαιρούμενα (A-1)

2 : Μετα-γαλακτωματοποιούμενα (A-2)

3 : Διαλυτοαφαιρούμενα (A-3)

Μέθοδος B : Ορατά

Τύπος 1 : Υδατοαφαιρούμενα (B-1)

2 : Μετα-γαλακτωματοποιούμενα (B-2)

3 : Διαλυτοαφαιρούμενα (B-3)

#### **4.10.4 Κατά ASTM E-165 έκδοση 1995**

(Ομοίως κατά ASME V, άρθρο 24, SE-165 έκδοση 1995)

Τύπος I - Φθορίζοντα

Μέθοδος A - Υδατοαφαιρούμενα (E 1209)

B - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα, λιπόφιλος γαλ/τής (E 1208)

C - Διαλυτοαφαιρούμενα (E 1219)

D - Μετα-γαλακτωματοποιούμενα, υδρόφιλος γαλ/τής (E1210)

Τύπος II - Ορατά

Μέθοδος A - Υδατοφαιρούμενα (E1418)

C - Διαλυτοαφαιρούμενα (E 1220)

#### 4.11 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η επιλογή της βέλτιστης για κάθε περίπτωση μεθόδου απαιτεί εξαιρετική πείρα στα συγκεκριμένα δοκίμια του συγκεκριμένου παραγωγού (άρα και γνώση των σφαλμάτων που αναμένεται να έχουν). Επομένως, τα παρακάτω μόνο ως συστάσεις έχουν αξία, και όχι ως απόλυτος κανόνας, προκειμένου για τη μεγαλύτερη δυνατή ευαισθησία.

- Χυτά : Φθορίζοντα υδατοαφαιρούμενα και ξηρός εμφανιστής (για χυτά υψηλής ακρίβειας, μεταγαλακτωματοποιούμενος διεισδυτής υψηλής ευαισθησίας και ξηρός εμφανιστής)
- Συγκολλήσεις : Ορατά διαλυτοαφαιρούμενα και υγρός μη υδατικός εμφανιστής (είτε φθορίζοντα υδατοαφαιρούμενα)
- Σφυρήλατα: Μεταγαλακτωματοποιούμενα φθορίζοντα μέσης ή υψηλής ευαισθησίας και ξηρός εμφανιστής
- Μη περιστρεφόμενα μέρη μηχανών: Μεταγαλακτωματοποιούμενα φθορίζοντα μέσης ευαισθησίας και ξηρός εμφανιστής
- Περιστρεφόμενα μέρη μηχανών: Μεταγαλακτωματοποιούμενα φθορίζοντα υψηλής ευαισθησίας και ξηρός εμφανιστής
- Αεροπορικό υλικό: Διαλυτοαφαιρούμενα φθορίζοντα υψηλής ευαισθησίας, υγρός μη υδατικός εμφανιστής και εξαιρετικά μεγάλοι χρόνοι διείσδυσης
- Ανίχνευση Δυναμοδιάβρωσης (Stress Corrosion Cracking-SCC): Όπως πριν
- Δοκίμια που υπέστησαν θερμική κατεργασία: Υδατοαφαιρούμενα φθορίζοντα χαμηλής ευαισθησίας και ξηρός εμφανιστής
- Πλαστικά: Ορατά υδατοφαιρούμενα (προσοχή στην επίδραση στο πλαστικό, πρέπει να προηγηθεί δοκιμή)
- Γυαλί: Φθορίζοντα και ξηρός εμφανιστής είτε ορατά και υγρός μη υδατικός εμφανιστής. Ειδικά για γυαλιά ή εφυσωμένα (σμαλτοποιημένα, πορσελιανοποιημένα) μη αγώγιμα υλικά, έχει αναπτυχθεί ξεχωριστή μέθοδος, που λέγεται Electrified Particles Testing.

- Πορώδη υλικά (π.χ. κεραμικά ή είδη υγιεινής πριν την πορσελιανοποίηση). Δεν μπορούν να εφαρμοστούν τα Δ.Υ., λόγω εξαιρετικά μεγάλου υποβάθρου μη σχετικών ενδείξεων. Έχει αναπτυχθεί η μέθοδος Filtered Particle Testing.

#### 4.12 ΕΙΚΟΝΑ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Συχνά αρκεί να προσδιοριστεί εάν μία ασυνέχεια είναι γραμμική (η μία διάσταση μεγαλύτερη του τριπλασίου της άλλης) ή στρογγυλόμορφη. Όμως είναι χρήσιμο να αναφέρουμε τις βασικές ασυνέχειες υλικών και τις συνήθεις εικόνες των ενδείξεων Δ.Υ. που προκαλούν.

- Ρήγματα από θερμότητα καθώς και ρήγματα τροχίσματος. Γραμμικές ενδείξεις, συχνά διακλαδούμενες (δικτυωτές).

- Δυναμοδιάβρωση (SCC) : Μικρές, λεπτές, πολύ ευκρινείς και συχνά «οδοντωτές» (jagged) γραμμές. Συχνά αρκετές μαζί, επίσης συχνά ξεκινούν από σημείο τρηματικής διάβρωσης (pitting). Στα φθορίζοντα διεισδυτικά, ίσως έχουν εμφάνιση ανοικτού μπλε αντί πρασινο-κίτρινου χρώματος.

- Κρυόπηγμα χυτού (cold shut) : Ευθείες ή πολύ ελαφρά καμπύλες «λείες» γραμμές, συνεχείς ή διακεκομμένες.

- Αναδίπλωση σφυρήλατου (forging lab): Λεπτές συνεχείς (σπανιότερα διακεκομμένες) γραμμές

- Μικροδιακενώσεις συστολής χυτών (ιδίως Al/Mg): Εμφάνιση πολλών μικρών και συγκεντρωμένων πόρων.

- Ρήγματα : Συνεχείς (ή σπανιότερα διακεκομμένες) γραμμές, συχνότατα «οδοντωτές» (jagged).

- Ραφή σε προϊόν εξέλασης/διέλασης (seam) είτε επίμηκες έγκλεισμα (stringer). Συνεχής ή διακεκομμένη «λεία» γραμμή (ευθεία ή πολύ ελαφρά καμπύλη).

- Πόροι: Στρογγυλόμορφες έντονες ενδείξεις (διακεκριμένες - ξεχωριστές).

- Μακροδιακένωση συστολής χυτών: Εμφάνιση μεγάλων και εκτεταμένων πόρων, συχνά με δενδριτική διάταξη.

- Ρήγματα κρατήρα συγκολλήσεων : Γραμμική ή στρογγυλόμορφη εμφάνιση (αναζητείστε τον κρατήρα).

- Ανοδιωμένες επιφάνειες: Εμφανίζουν εκτεταμένο φυσικό πορώδες (μή σχετικές ενδείξεις)

- Στενά ρήγματα (π.χ. ρήγματα κόπωσης ή δυναμοδιάβρωσης): Ενδέχεται να έχουν εμφάνιση άσπρου-μπλε αντί πρασινο-κίτρινου (φθορίζοντα διεισδυτικά), διότι δεν μπορεί να διεισδύσει όλη η φθορίζουσα βαφή και διεισδύει (άρα ανασύρεται και φθορίζει) μόνο το μέρος της που παρουσιάζει έντονο φθορισμό.

#### **4.13 ΥΓΙΕΙΝΗ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ**

Η μέθοδος Δ.Υ. χρησιμοποιεί πολλά χημικά, μεταξύ των οποίων διαλύτες και οργανικές ουσίες (έλαια) παράγωγα του πετρελαίου. Ισχύουν λοιπόν οι γενικοί κανόνες για χρήση ποδιάς και γαντιών, καλό πλύσιμο των λερωμένων ρούχων και των χεριών, ενώ ενδείκνυται η χρήση προστατευτικών γυαλιών και μάσκας (ιδιαίτερα στο στάδιο εφαρμογής εμφανιστή).

Παρόλο που όλα τα υλικά των Δ.Υ. ελέγχονται για την (μη) τοξικότητα τους, ενίοτε παρουσιάζεται ερεθισμός του δέρματος και οι προστατευτικές κρέμες χεριών αποδεικνύονται εξαιρετικά χρήσιμες.

Από άποψη ασφάλειας, είναι απαραίτητα τα κατάλληλα πυροσβεστικά μέσα στο χώρο εργασίας και ο καλός εξαερισμός (φυσικός ή τεχνητός). Όταν χρησιμοποιούμε μαύρο φως, ο τακτικός έλεγχος του φίλτρου για γδαρσίματα είναι απαραίτητος. Όσον αφορά τη χρήση του ηλεκτρισμού, εφαρμόζονται οι γνωστοί γενικοί κανόνες.

Όπως σε όλους τους χώρους εργασίας, συνιστάται η χρήση υποδημάτων ασφαλείας (δεν είναι τόσο απίθανο να μας πέσει ένα δοκίμιο) και όσον αφορά τις εργασίες σε εργοτάξιο, ισχύουν και πάλι οι γνωστοί κανόνες (προστατευτικό κράνος, συνοδός κοντά μας κ.λπ.).

#### **4.14 ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (TEST BLOCKS)**

Ο συνηθέστερα εφαρμοζόμενος Ποιοτικός Έλεγχος των υλικών της μεθόδου γίνεται με τη χρήση Δοκιμίων Ελέγχου-Σύγκρισης (Test Blocks) διαφόρων μορφών, υλικών και τύπων.

Συχνά ελέγχεται όλο το «σύστημα», αλλά είναι δυνατόν να ελεγχθεί και ένας μόνο παράγοντας (διεισδυτής, μεταγαλακτωματοποιητής, εμφαναστής, εφαρμοζόμενος χρόνος διείσδυσης κ.λπ.). Κάθε δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί



πολύ λίγες φορές και κατόπιν απαιτείται επίπονη και όχι πάντα επιτυχής προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί.

Τα κυριότερα Δοκίμια Ελέγχου-Σύγκρισης παρουσιάζονται κατωτέρω.

#### **4.14.1 Δοκίμια Σύγκρισης Αλουμινίου (Aluminium Test Blocks)**

Πρόκειται για δοκίμια από αλουμίνιο 2024-T3, διαστάσεων 50 x 57 x 8 mm. Θερμαίνονται και ψύχονται απότομα με ειδική διαδικασία, ώστε να αποκτήσουν επιφανειακά θερμικά ρήγματα. Συνήθως έχουν μία σχισμή 1,5 x 1,5 mm κατά πλάτος, ώστε να υπάρχουν δύο ξεχωριστές αλλά όμοιες επιφάνειες, όπου θα γίνει η δοκιμή-σύγκριση των αναλωσίμων είτε άλλων παραγόντων της μεθόδου.

#### **4.14.2 Κεραμικά Δοκίμια Σύγκρισης (Ceramic)**

Πρόκειται για επίπεδους κυκλικούς δίσκους από μη εφυσωμένο κεραμικό, που φέρει στρογγυλόμορφες ασυνέχειες διαφόρων διαστάσεων. Συγκρίνονται διεισδυτές (χωρίς χρήση εμφανιστή) σε δύο διαφορετικά δοκίμια, μετρώντας-συγκρίνοντας τις εμφανιζόμενες ενδείξεις.

#### **4.14.3 Ανοδιωμένα-Επιμεταλλωμένα Δοκίμια (Anodized/Chrome-plated Nickel Panels)**

Τέτοια δοκίμια χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση τόσο της ευαισθησίας του διεισδυτή όσο και της ικανότητας έκπλυσης (washability) του επιφανειακού διεισδυτή (κατά τη χρήση γαλακτωματοποιητή).

Παρόμοιο δοκίμιο είναι το TAM panel, με δύο ξεχωριστές επιχρωμιωμένες επιφάνειες, μία λεία και μία τραχιά. Στη λεία επιφάνεια ελέγχεται/συγκρίνεται η ευαισθησία του διεισδυτή και στην τραχιά η ικανότητα έκπλυσης (washability) του γαλακτωματοποιητή (και γενικότερα των παραμέτρων έκπλυσης).

#### **4.14.4 Άλλα Δοκίμια Ελέγχου - Σύγκρισης**

Υπάρχουν πολλές και διάφορες μορφές δοκιμίων ελέγχου ή σύγκρισης, όπως:

- Ελάσματα αλουμινίου και χαλύβδινα ελάσματα, για τον έλεγχο των παραγόντων έκπλυσης του επιφανειακού διεισδυτή.

- Χαλύβδινα ελάσματα, για τον έλεγχο απώλειας ικανότητας φθορισμού, σε υψηλή θερμοκρασία.

- Δοκίμια για τον έλεγχο της διαβρεκτικής ικανότητας του δεισδυτή, την ικανότητα αφαίρεσης του εμφανιστή, την επιδεκτικότητα διάβρωσης του υλικού από τα χρησιμοποιούμενα Δ.Υ. και πολλά άλλα.

## 5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 5.1.1 Μαγνήτες και Μαγνητισμός

Μαγνήτης (magnet) ονομάζεται το σώμα που έχει την ικανότητα να έλκει μικρά κομματάκια σιδήρου, ενώ η σχετική ιδιότητα καλείται μαγνητισμός. Υλικά τα οποία έλκονται από ένα μαγνήτη γίνονται και τα ίδια μαγνήτες (έλκουν ρινίσματα σιδήρου), όταν τριφτούν πάνω σε άλλο μαγνήτη ή έστω βρεθούν κοντά του, διατηρώντας μάλιστα μέρος από τις μαγνητικές τους ιδιότητες και στο μέλλον.

Πρώτα οι Κινέζοι παρατήρησαν τις μαγνητικές ιδιότητες ενός φυσικού ορυκτού, του οξειδίου του σιδήρου ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Οι Έλληνες ανακάλυψαν το ορυκτό αυτό στη Μαγνησία της Μικράς Ασίας και το ονόμασαν «μαγνητίτη», από όπου προέρχεται και η λέξη μαγνήτης.

Οι Αγγλοσάξονες, ονομάζουν το ίδιο ορυκτό «Iodestone». Ο μαγνητίτης (μόνιμος φυσικός μαγνήτης) έχει αποκτήσει τις μαγνητικές του ιδιότητες υπό την επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου, με την πάροδο των αιώνων.

#### 5.1.2 Πόλοι του Μαγνήτη

Αν βυθίσουμε (ή πλησιάσουμε αρκετά) ένα ραβδόμορφο μαγνήτη σε ρινίσματα σιδήρου, παρατηρούμε ότι αυτά συγκεντρώνονται στις δύο άκρες του μαγνήτη. Αυτές οι άκρες ονομάζονται «πόλοι» (pole) και το ενδιάμεσο διάστημα «ουδέτερη ζώνη».

Αν ο ραβδόμορφος μαγνήτης μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα (π.χ. στηριζόμενος μόνο στο μέσον του), τότε θα προσανατολιστεί προς τη διεύθυνση μαγνητικού βορρά -μαγνητικού νότου. Ο πόλος που δείχνει προς το μαγνητικό βορρά ονομάζεται «βόρειος πόλος του μαγνήτη» και συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα «N», ενώ ο άλλος «νότιος πόλος του μαγνήτη» και συμβολίζεται με το γράμμα «S».

Εάν πλησιάσουμε δύο μαγνήτες, παρατηρούμε ότι οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται (N-N, S-S) ενώ οι ετερώνυμοι έλκονται (N-S).

### 5.1.3 Στοιχειώδεις Μαγνήτες - Μαγνητικές Περιοχές

Εάν τεμαχίζουμε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη συνεχώς, θα φθάσουμε τελικά σε ένα «στοιχειώδη» ή «μοριακό» μαγνήτη ή «στοιχειώδη μαγνητική περιοχή» (magnetic domain).

Οι μαγνητικές ιδιότητες του στοιχειώδη μαγνήτη οφείλονται σε κυκλικά ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται μέσα στα άτομα, λόγω της περιφοράς των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα καθώς και γύρω από τον άξονα τους (ιδιοπεριστροφή, spin).

Εάν ένα υλικό που μπορεί να μαγνητιστεί βρεθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο, οι στοιχειώδεις μαγνήτες προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου και επομένως θεωρούμε ότι οι μαγνητικές περιοχές αυξάνουν σε μέγεθος και ελαττώνονται σε αριθμό. Στην περίπτωση του μαγνητικού κορεσμού (magnetic saturation) θεωρούμε ότι όλο το υλικό έχει γίνει μια μαγνητική περιοχή και επομένως δεν μπορεί να μαγνητιστεί περαιτέρω.



**ΕΙΚΟΝΑ 5.1:** Στοιχειώδεις Μαγνήτες - Μαγνητικές Περιοχές

#### 5.1.4 Το Μαγνητικό Πεδίο - Οι Μαγνητικές Δυναμικές Γραμμές

Εάν τοποθετήσουμε κάτω από μία γυάλινη πλάκα ένα ραβδόμορφο μαγνήτη, ρίξουμε ρινίσματα σιδήρου πάνω σ' αυτήν και χτυπήσουμε ελαφρά την πλάκα (ώστε να ανακινηθούν τα ρινίσματα), θα παρατηρήσουμε ότι αυτά λαμβάνουν θέση σε κανονικές γραμμές, οι οποίες βαίνουν από τον ένα πόλο στον άλλο. Θεωρούμε ότι αυτές οι γραμμές εξέρχονται από το υλικό στο βόρειο πόλο του μαγνήτη και εισέρχονται πάλι στο νότιο πόλο. Μέσα δε στο υλικό, θεωρούμε ότι οι γραμμές βαίνουν από το νότιο προς το βόρειο μαγνητικό πόλο.

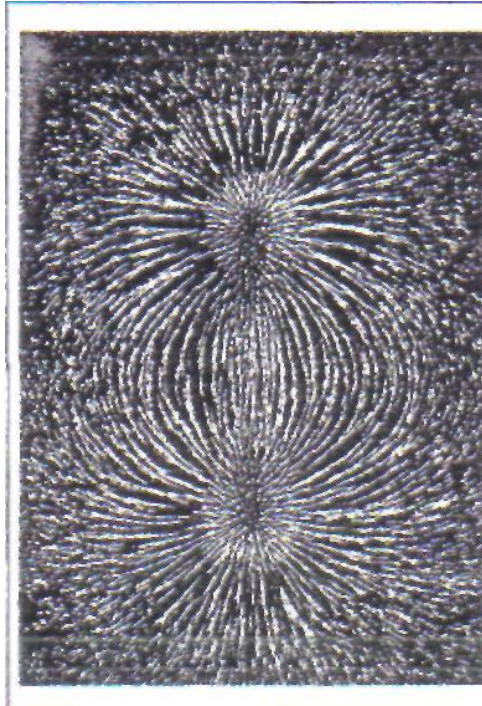
Το σύστημα αυτών των γραμμών ονομάζεται «μαγνητικό φάσμα» και οι γραμμές «μαγνητικές δυναμικές γραμμές» (magnetic lines of force).

Αν τοποθετήσουμε μικρές μαγνητικές βελόνες πάνω στη γυάλινη πλάκα, κάθε βελόνα θα διαταχθεί σε διεύθυνση εφαπτόμενη μίας δυναμικής γραμμής. Συνάγεται λοιπόν ότι και τα ρινίσματα του σιδήρου, μαγνητιζόμενα υπό την επίδραση του μαγνήτη, διατάσσονται κατά την εφαπτόμενη μίας δυναμικής γραμμής.

Στο χώρο γύρω από το μαγνήτη έχει σχηματιστεί ένα δυναμικό πεδίο που καλείται «μαγνητικό πεδίο» (magnetic field).

Μαγνητικό πεδίο καλείται ο χώρος εντός του οποίου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις και το μαγνητικό φάσμα είναι μία απεικόνιση αυτού του πεδίου. Κάθε ποσότητα μαγνητισμού (εφόσον δεν υπάρχει αντίσταση/τριβή) θα κινηθεί κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής και θα πάρει θέση στον πλησιέστερο πόλο.

Οι δυναμικές γραμμές δεν είναι δυνατό να διακοπούν ούτε να τέμνονται μεταξύ τους.



**ΕΙΚΟΝΑ 5.2:** Μαγνητικές Δυναμικές Γραμμές

Ένας ραβδόμορφος μαγνήτης είναι ένα μαγνητικό δίπολο. Τα ρινίσματα σιδήρου δίνουν τη μορφή των δυναμικών γραμμών .

### 5.1.5 Το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο

Η Γη αποτελείται από τρία κυρίως στρώματα: το φλοιό, το μανδύα και τον πυρήνα (από την επιφάνεια προς το κέντρο).

Ο πυρήνας, ακτίνας 3.480 χλμ., αποτελείται από δύο τμήματα, τον εξωτερικό πυρήνα (πάχους 2.260 χλμ.) και τον εσωτερικό πυρήνα (ακτίνας 1.215 χλμ.).

Ο εσωτερικός πυρήνας είναι στερεός ενώ ο εξωτερικός βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Το ρευστό υλικό του εξωτερικού πυρήνα εμφανίζει μεταλλικές ιδιότητες, λόγω της υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας του. Εξάλλου, πιθανότατα αποτελείται κυρίως από σίδηρο και νικέλιο. Ο εξωτερικός πυρήνας της γης βρίσκεται σε βάθος 2.900 έως 5.100 χλμ. από την επιφάνεια και η θερμοκρασία του φθάνει τους 4.700 °C.

Το μαγνητικό πεδίο της γης παράγεται κυρίως στον εξωτερικό πυρήνα. Εκεί παρουσιάζονται ρεύματα ρευστών υλικών, που προκαλούν ηλεκτρικά ρεύματα, καθώς κινούνται μέσα στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Επομένως η ροή των ρευστών υλικών του εξωτερικού πυρήνα και η διεύθυνση των γραμμών του γήινου μαγνητικού

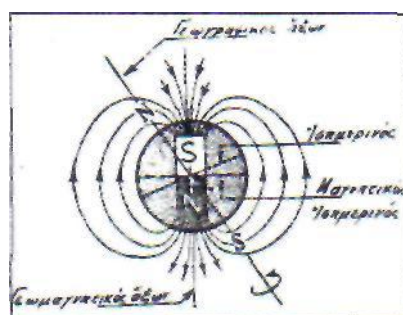
πεδίου έχουν στενή σύνδεση μεταξύ τους. Το πολύπλοκο αυτό μαγνητοϋδροδυναμικό φαινόμενο έχει την επιστημονική ονομασία «γεωδυναμό».

Η διεύθυνση μαγνητικού βορρά-νότου σχηματίζει σήμερα γωνία  $12^\circ$  με τον άξονα περιστροφής της γης. Ολόκληρος ο πλανήτης συμπεριφέρεται σαν μαγνητικό δίπολο αυτής της διεύθυνσης, με τις δυναμικές γραμμές να εισέρχονται στο βόρειο άκρο της γης (νότιος μαγνητικός πόλος) και να εξέρχονται στο νότιο άκρο της (βόρειος μαγνητικός πόλος). Η ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 0,5 Gauss. Ορισμένα είδη ζώων (όπως π.χ. μεταναστευτικά πουλιά και θαλάσσιες χελώνες) είναι σε θέση να αντιληφθούν τόσο την ένταση όσο και τη διεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιώντας αυτή την ικανότητα για τις μεταναστεύσεις τους. Μία ενδεχόμενη εξήγηση πιθανόν να έχει σχέση με το γεγονός ότι στον εγκέφαλο αυτών των ζώων έχουν βρεθεί κρύσταλλοι μαγνητίτη.

Είναι γνωστό ότι το γήινο μαγνητικό πεδίο αλλάζει φορά (αναστρέφεται) αρκετές φορές μέσα σε ένα εκατομμύριο χρόνια, λόγω των κινήσεων του υλικού του εξωτερικού πυρήνα. Μια σχετική αξιόπιστη πρόβλεψη, μάλιστα, τοποθετεί την επόμενη αντιστροφή μετά από 30.000 χρόνια.

Το γήινο μαγνητικό πεδίο, καθώς εκτείνεται στο διάστημα, δημιουργεί ζώνες που εκτρέπουν ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας που κατευθύνονται προς τη γη (όπως π.χ. μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας και του ηλιακού ανέμου). Οι ζώνες αυτές, γνωστές σαν «ζώνες Van Allen», είναι ευεργετικές για τη ζωή στον πλανήτη μας, διότι οι ανωτέρω ακτινοβολίες, εάν δεν ελαττώνονταν σε ένταση, θα ήταν εξαιρετικά επιβλαβείς για όλες τις μορφές ζωής, είτε άμεσα είτε έμμεσα (διασπώντας το όζον και διαλύοντας το επίσης προστατευτικό στρώμα του).

Σημείωση: Κυριότερη πηγή: Κ. Κουτίτας, Ο πυρήνας της Γης, Περισκόπιο της Επιστήμης Ν° 228, Μάιος 1999.



**ΕΙΚΟΝΑ 5.3:** Η γη συμπεριφέρεται ως μαγνητικό δίπολο

### 5.1.6 Υλικά Μόνιμων Μαγνητών

Ο φυσικός μαγνητίτης είναι οξειδίο σιδήρου ( $Fe_3O_4$ ), το οποίο μαγνητίστηκε με την πάροδο των αιώνων, από το γήινο μαγνητικό πεδίο. Μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ο μαγνητίτης ήταν ο ισχυρότερος μόνιμος μαγνήτης σε χρήση, παρότι κατασκευάζονταν μαγνήτες από χάλυβα, οι οποίοι όμως ήταν ασθενείς και όχι ιδιαίτερα αξιόπιστοι.

Στις αρχές του 20ου αιώνα αναπτύχθηκαν ισχυροί χαλύβδινοι μαγνήτες, που περιέχουν βολφράμιο, χρώμιο, κοβάλτιο ή μολυβδένιο.

Ωστόσο, πολύ γρήγορα ξεπεράστηκαν (δεκαετία 1930) με την εμφάνιση μαγνητών από Alnico (κράμα σιδήρου, αλουμινίου, νικελίου και κοβαλτίου), το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα, ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες άνω των 500 °C.

Κατά τη δεκαετία του 1950 αναπτύχθηκαν από την εταιρία Philips μόνιμοι μαγνήτες από συνθετικά οξείδια του σιδήρου, οι λεγόμενοι «φερρίτες». Αυτοί, λόγω χαμηλού κόστους κατασκευής και υψηλής αξιοπιστίας, χρησιμοποιούνται έκτοτε ευρύτατα.

Η τέταρτη κατηγορία υλικών μόνιμων μαγνητών είναι τα κράματα κοβαλτίου και σπάνιων γαιών (π.χ. σαμάριο και νεοδύμιο). Εμφανίστηκαν στη δεκαετία του 1970 και βρήκαν πολύ γρήγορα εμπορικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής μαγνήτισης και της μικρής ποσότητας-όγκου υλικού. Κατά τη δεκαετία του 1980 εμφανίστηκαν οι λεγόμενοι «νεομαγνήτες» από κράμα σιδήρου και σπανίων γαιών, που αντικατέστησαν τους μαγνήτες κοβαλτίου-σπανίων γαιών, λόγω συνδυασμού υψηλής ισχύος και φθηνού κόστους κατασκευής.

Η ανακάλυψη των νεομαγνητών άνοιξε το δρόμο της αντικατάστασης των ηλεκτρομαγνητών από μόνιμους μαγνήτες, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις απαιτήσεων μικρού όγκου, όπως πολλές περιπτώσεις ηλεκτρικών συσκευών, μικρών ηλεκτροκινητήρων, ρομποτικής, κατασκευής αισθητήρων (π.χ. αισθητήρες συστήματος ABS αυτοκινήτων) αλλά και στην τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (ιδιαίτερα για την κατασκευή οδηγών δισκετών – disc drive και εκτυπωτών).

Όσον αφορά το σχήμα των μόνιμων μαγνητών, εμφανίζεται μεγαλύτερη παραμένουσα μαγνήτιση όσο η μάζα του μαγνήτη είναι μακριά από τους πόλους, γι' αυτό και «ευνοϊκά» σχήματα είναι το σχήμα πετάλου και το βελονοειδές σχήμα.



Σημείωση: Ιδε και Η. Παπαθανάσης, Νεομαγνήτες, Περισκόπιο της Επιστήμης Νο 230, Ιούλιος-Αύγουστος 1999.

## 5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΣΕΙΣ

### 5.2.1 Νόμος του Coulomb - Ποσότητα Μαγνητισμού

Η δύναμη έλξης ή άπωσης μεταξύ δύο μαγνητών δίνεται από την έκφραση:

$$F = \frac{k \times m_1 \times m_2}{r^2} \quad (5.1)$$

όπου  $k$  μία σταθερά που εξαρτάται από τις μονάδες και το περιβάλλον μέσο (κενό, αέρας ή άλλο υλικό),  $m_1$  και  $m_2$  οι ποσότητες μαγνητισμού των δύο μαγνητών αντίστοιχα και  $r$  η απόσταση μεταξύ των δύο μαγνητών.

$$K = \frac{m}{4p} \quad (5.2)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Για τον αέρα και το κενό ισχύει:

$$m = 4p \times 10^{-7} \frac{Nt}{A^2} \text{ (Διεθνές Σύστημα Μονάδων)}. \quad (5.3)$$

Σημείωση: Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.) και για περιβάλλον μέσο τον αέρα ή το κενό, η έκφραση γίνεται:

$$F = \frac{10^{-7} \times m_1 \times m_2}{r^2} \quad (5.4)$$

Όπου  $r$  η απόσταση σε μέτρα (m),  $F$  η δύναμη σε Newton (Nt) και  $m_1, m_2$  η ποσότητα μαγνητισμού σε Ampere  $\times$  μέτρα ( $A \times m$ ).

### 5.2.2 Ένταση του Μαγνητικού Πεδίου

Εάν τοποθετήσουμε μία ποσότητα μαγνητισμού  $m$  μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο βρίσκεται στο κενό ή στον αέρα, θα εξασκηθεί επάνω της δύναμη  $F$ , σύμφωνα με την έκφραση:

$$F = m_0 \times H \times m \quad (5.5)$$

όπου  $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου και  $\mu_0$  σταθερά που εξαρτάται από τις μονάδες {η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, στο Διεθνές Σύστημα ίση με:

$$\left(4\pi \times 10^{-7} \text{ Nt/A}^2\right) \quad (5.6)$$

Από την τελευταία και την προηγούμενη ισότητα (Νόμος του Coulomb) προκύπτει ότι στο Διεθνές Σύστημα ισχύει:

$$H = m / 4\pi r^2 \quad (5.7)$$

όπου  $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου, μετρούμενη σε A/m (είτε Nt/Cb).

Στο Ηλεκτρομαγνητικό Σύστημα Μονάδων (ΗΜΣ) η ένταση του μαγνητικού πεδίου μετράται σε Oersted ( $1 \text{ A/m} = 4\pi/1000 \text{ Oe}$ ).

### 5.2.3 Μαγνητική Επαγωγή - Μαγνητική Διαπερατότητα

Εάν τοποθετήσουμε ένα δοκίμιο από υλικό που μπορεί να μαγνητιστεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και παρατηρήσουμε τις δυναμικές γραμμές του πεδίου, θα δούμε ότι αυτές κάμπτονται και μεγάλος αριθμός τους περνά μέσα από το δοκίμιο. Συγχρόνως το υλικό μαγνητίζεται και σχηματίζεται νότιος πόλος στο άκρο στο οποίο εισέρχονται οι μαγνητικές γραμμές ενώ ο βόρειος πόλος σχηματίζεται στο άκρο από το οποίο εξέρχονται οι δυναμικές γραμμές.

Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών μέσα στο δοκίμιο, ανά μονάδα επιφάνειας του κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών, ονομάζεται **μαγνητική επαγωγή** και συμβολίζεται με  $B$ .

$$\text{Ισχύει η σχέση: } B = m \times H \quad (5.8)$$

όπου  $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Έχουμε δει ότι η ένταση  $H$  μετράται σε A/m (SI). Η μαγνητική επαγωγή μετράται στο μεν Διεθνές Σύστημα σε Tesla, στο δε ΗΜΣ σε Gauss.

$$1\text{Tesla} = 1\text{Nt/A} \times m = 10^4 \text{ Gauss} \quad (5.9)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού εκφράζει το πόσο ισχυρά μαγνητίζεται ένα υλικό και μετράται σε  $\text{Nt/A}^2$  (SI). Στο ΗΜΣ η μαγνητική διαπερατότητα μετράται σε Gauss/Oersted.

Η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είτε του κενού θεωρείται στο μεν ΗΜΣ ίση με τη μονάδα (1G/Oe) στο δε SI ίση με:

$$4\pi \times 10^{-7} \text{ Nt} / \text{A}^2 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry} / \text{m} \quad (5.10)$$

(Henry είναι η μονάδα ηλεκτρικής αυτεπαγωγής).

Πρέπει να έχει ήδη γίνει σαφές (ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μαγνητικής επαγωγής και έντασης μαγνητικού πεδίου στο ΗΜΣ) ότι αυτά τα δύο μεγέθη ουσιαστικά εκφράζουν συναφείς φυσικές έννοιες. Μιλούμε όμως για ένταση του μαγνητικού πεδίου όταν εξετάζουμε το χώρο εκτός του δοκιμίου, ενώ για μαγνητική επαγωγή όταν εξετάζουμε τι συμβαίνει μέσα στο δοκίμιο.

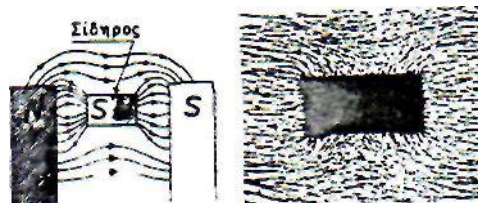
Η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού μπορεί να εκφραστεί και με τη σχέση:

$$m = m_r \times m_0 \quad (5.11)$$

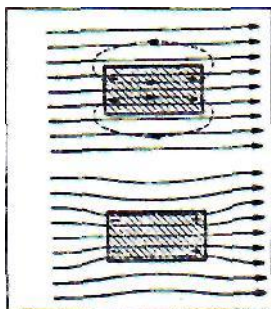
όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού/αέρα και  $\mu_r$ , η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (αδιάστατο μέγεθος).

Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την κατάσταση μαγνήτισης του υλικού.

Σημείωση: Όταν δίνονται τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, συνήθως πρόκειται για τις μέγιστες.



**ΕΙΚΟΝΑ 5.4:** Οι δυναμικές γραμμές τείνουν να διέλθουν όλες εντός του μαλακού σιδήρου



**Εικόνα 5.5:** Παραμόρφωση του αρχικού ομογενούς πεδίου από την παρουσία σιδηρομαγνητικού υλικού

## 5.2.4 Μαγνητική Ροή

Μέσα σε ένα μαγνητισμένο υλικό, ονομάζουμε μαγνητική ροή  $\Phi$  εντός μιας επιφάνειας  $S$  τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που τέμνουν κάθετα την επιφάνεια αυτή. Η μαγνητική ροή λοιπόν, ισούται με τη μαγνητική επαγωγή επί το εμβαδόν  $S$ :

$$\Phi = B \times S \quad (5.12)$$

Εάν η επιφάνεια σχηματίζει γωνία  $\alpha$  με τη διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών, τότε:

$$\Phi = B \times S \times \sin \alpha \quad (5.13)$$

Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων, μονάδα μαγνητικής ροής είναι το Weber (Wb).

$$1\text{Wb} = 1\text{V} \times \text{sec} = 1\text{Nt} \times \text{m} / \text{A} = 1\text{Tesla} \times \text{m}^2 = 10^8 \text{ δυναμικές γραμμές} \quad (5.14)$$

Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μετράται σε αριθμό δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας και ουσιαστικά εκφράζει τη μαγνητική επαγωγή.

$$1 \text{ Tesla} = 1\text{Wb}/\text{m}^2 = 10^8 \text{ γραμμές}/\text{m}^2 \quad (5.15)$$

$$\text{Στο ΗΜΣ } 1 \text{ Gauss} = 1 \text{ γραμμή}/\text{cm}^2 = 10^{-4} \text{ Tesla} \quad (5.16)$$

## 5.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

### 5.3.1 Σιδηρομαγνητικά, Παραμαγνητικά και Διαμαγνητικά Υλικά

Σιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά που μαγνητίζονται έντονα, έχουν επομένως πολύ μεγάλη σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Τέτοια υλικά είναι πολύ λίγα και συγκεκριμένα Σίδηρος, οι περισσότεροι χάλυβες, το Κοβάλτιο, το Νικέλιο, το Γαδολίνιο και ορισμένα θάματα τους. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έλκονται ισχυρά από άλλους μαγνήτες. Παραμαγνητικά είναι τα υλικά που έλκονται ελάχιστα από ένα μαγνήτη και μαγνητίζονται επίσης ελάχιστα. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα τους είναι ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδας. Παραμαγνητικά υλικά είναι το Αργίλιο, το Χρώμιο καθώς και οι ωστενιτικοί χάλυβες (π.χ. ανοξείδωτοι σειράς 300).

Διαμαγνητικά είναι τα υλικά που έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα λίγο μικρότερη της μονάδας και απωθούνται ελαφρά από τους μαγνήτες. Η πλειονότητα των φυσικών στοιχείων και υλικών είναι διαμαγνητικά, όπως ο Χαλκός, ο Άνθρακας και το Υδρογόνο.

### 5.3.2 Παραμαγνητισμός

Ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου συμπεριφέρεται σαν ένας μικροσκοπικός βρόχος ηλεκτρικού ρεύματος, παράγοντας μία μαγνητική διπολική σπη εκ περιφοράς  $\mu_L$  (θυμίζουμε ότι μαγνητική ροπή ενός δίπολου καλείται το γινόμενο της ποσότητας μαγνητισμού επί την απόσταση μεταξύ των πόλων). Ταυτόχρονα όμως παράγεται και μία μαγνητική διπολική ροπή  $\mu_s$ , λόγω ιδιοπεριστροφής του ηλεκτρονίου.

Σε πάρα πολλές περιπτώσεις ατόμων και ιόντων τα ανωτέρω μαγνητικά φαινόμενα (τόσο τα  $\mu_L$  όσο και τα  $\mu_s$ ) αλληλοαναιρούνται, ώστε το άτομο να μη παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες. Τούτο συμβαίνει για παράδειγμα στα ευγενή αέρια και στο  $\text{Cu}^+$  (που αποτελεί το συνηθισμένο χαλκό).

Σε άλλες όμως περιπτώσεις (όπως στο  $\text{Mn}^{2+}$  και στο  $\text{Gd}^{3+}$ ), η μαγνητική δράση των ηλεκτρονίων του ατόμου δεν αλληλοαναιρείται, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται σε κάθε άτομο μαγνητική διπολική ροπή  $\mu$ . Εάν τέτοια άτομα τεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τα μαγνητικά δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν παράγοντας συνολική μαγνητική ροπή  $N \times \mu$ , όπου  $N$  ο αριθμός των ατόμων. Όμως αυτός ο προσανατολισμός εμποδίζεται από τις κρούσεις μεταξύ των ατόμων στα αέρια υλικά, και από τις θερμικές ταλαντώσεις, στα στερεά. Έτσι, η συνολική μαγνητική ροπή είναι εξαιρετικά μικρή. Σε αυτές τις περιπτώσεις μιλούμε για **παραμαγνητικά** υλικά.

Αν ένα παραμαγνητικό υλικό τοποθετηθεί μέσα σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο, έλκεται ελαφρά προς τον ισχυρότερο πόλο του πεδίου, εμφανίζοντας μαγνητική διαπερατότητα λίγο μεγαλύτερη της μονάδας.

### 5.3.3 Διαμαγνητισμός

Διαμαγνητισμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό τοποθετούμενο κοντά στον πόλο ενός ισχυρού μαγνήτη απωθείται. Διαμαγνητισμός υπάρχει σε όλα τα υλικά, αλλά επισκιάζεται σε ουσίες που αποτελούνται από άτομα που έχουν μαγνητική διπολική ροπή, δηλαδή στα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Υλικά στα οποία το φαινόμενο επικρατεί, ονομάζονται **διαμαγνητικά** και εμφανίζουν μαγνητική διαπερατότητα λίγο μικρότερη της μονάδας.

Κάθε ηλεκτρόνιο που περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου παρουσιάζει μαγνητική ροπή εκ περιφοράς  $\mu_L$ . Το άτομο όμως, συνολικά, δεν παρουσιάζει μαγνητική ροπή, διότι οι τροχιές των ηλεκτρονίων έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Εάν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε η γωνιακή ταχύτητα κάθε ηλεκτρονίου αυξάνεται ή μειώνεται, ανάλογα με τη φορά περιστροφής του, λόγω της εξασκούμενης πρόσθετης κεντρομόλου δύναμης. Εάν η ταχύτητα αυξηθεί, αυξάνεται και η μαγνητική ροπή. Εάν ελαττωθεί, ελαττώνεται η μαγνητική ροπή. Σε κάθε περίπτωση, η τελική μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου ελαττώνεται, εάν το αρχικό μαγνητικό δίπολο είναι ίδιας φοράς με το εξωτερικό πεδίο ενώ αυξάνεται, εάν αντιτίθεται σε αυτό. Στο άτομο, το αποτέλεσμα είναι η συνολική μαγνητική ροπή εκ περιφοράς των ηλεκτρονίων να μην είναι πλέον μηδενική, αλλά να επάγεται μαγνητική ροπή με φορά αντίθετη εκείνης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

#### 5.3.4 Σιδηρομαγνητισμός

Παρατηρείται μόνο σε πέντε στοιχεία (Fe, Co, Ni, Gd και Dy) και σε ορισμένα κράματα τους.

Σε αυτά τα υλικά παρουσιάζεται ένα ειδικό κβαντικό φαινόμενο (που δεν μπορεί να εξηγηθεί με όρους κλασσικής φυσικής) και που επιτρέπει στα υφιστάμενα γειτονικά μαγνητικά δίπολα να επιτύχουν υψηλό βαθμό προσανατολισμού, παρά την αντίθεση των θερμικών κινήσεων των ατόμων. Το φαινόμενο καλείται «σύζευξη ανταλλαγής» (μεταξύ των διαδοχικών ατόμων) και τα αντίστοιχα υλικά ονομάζονται σιδηρομαγνητικά.

Ο σιδηρομαγνητισμός δεν είναι μία ιδιότητα των μεμονωμένων ατόμων αλλά σχετίζεται με την ύπαρξη κρυσταλλικού πλέγματος.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά θεωρούμε ότι τα διαδοχικά ατομικά δίπολα είναι απολύτως παραλληλισμένα, μέσα στα όρια μιας περιοχής καλούμενης «μαγνητική περιοχή» (magnetic domain).

Η μαγνητική ροπή όμως κάθε περιοχής έχει τυχαία διεύθυνση, με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρούνται και να μην εμφανίζεται συνολική μαγνητική ροπή.

Υπό την επίδραση όμως ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές τείνουν να παραλληλιστούν. Ταυτόχρονα, οι περιοχές με μαγνητικό

προσανατολισμό ίδιας διεύθυνσης και φοράς με το εξωτερικό πεδίο αυξάνουν σε μέγεθος, σε βάρος των αντίθετα προσανατολισμένων.

Κατά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου έχουμε το φαινόμενο της μόνιμης μαγνήτισης, διότι τα όρια των περιοχών δεν ξαναγυρίζουν στις αρχικές θέσεις τους.

Η σύζευξη ανταλλαγής εξαφανίζεται απότομα (άρα παύει και η ιδιότητα του σιδηρομαγνητισμού), όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο για κάθε υλικό.

Η σύζευξη ανταλλαγής εξαφανίζεται απότομα (άρα παύει και η ιδιότητα του σιδηρομαγνητισμού), όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο για κάθε υλικό όριο (δηλ. τη θερμοκρασία Curie). Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, τα υλικά συμπεριφέρονται απλώς σαν παραμαγνητικά.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας εξαρτάται τόσο από την ένταση της μαγνητίζουσας δύναμης όσο και από τη (μαγνητική) προϊστορία του υλικού, είναι πάντως πολύ μεγαλύτερη της μονάδας.

### **5.3.5 Μαγνητικώς Μαλακά και Σκληρά Υλικά**

Ονομάζονται μαγνητικώς μαλακά εκείνα τα σιδηρομαγνητικά υλικά που έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα (μαγνητίζονται πολύ εύκολα) ενώ χάνουν το μεγαλύτερο μέρος της μαγνήτισης τους μόλις απομακρυνθούν από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (μικρή συγκρατησιμότητα - retentivity, μικρή παραμένουσα μαγνήτιση - permanent magnetism). Τέτοια υλικά είναι τα οξειδία του σιδήρου που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μαγνητικών σωματιδίων και οι περισσότεροι μαλακοί χάλυβες.

Μαγνητικώς σκληρά υλικά είναι εκείνα τα σιδηρομαγνητικά υλικά που μαγνητίζονται δύσκολα (έχουν μικρή σχετική μαγνητική διαπερατότητα και απαιτούν ισχυρό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο για να μαγνητιστούν), απομαγνητίζονται όμως δύσκολα, κρατώντας μεγάλο μέρος της μαγνήτισης τους όταν απομακρυνθούν από το πεδίο (μεγάλη συγκρατησιμότητα, μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση). Τέτοια υλικά είναι σκληροί χάλυβες με υψηλό περιεχόμενο σε άνθρακα και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών.

## 5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

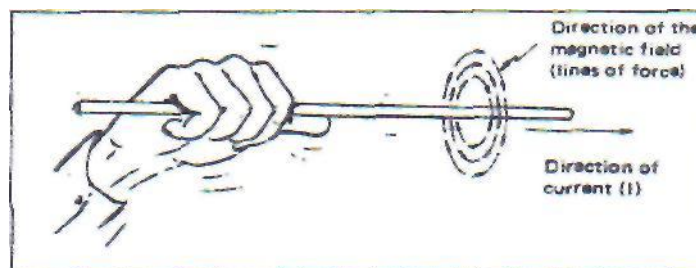
### 5.4.1 Σχέση Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού

Εάν διοχετεύσουμε ηλεκτρικό ρεύμα έντασεως  $I$  (amps) σε ένα μακρύ ευθύγραμμο αγωγό, τότε παράγεται μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτόν, με δυναμικές γραμμές διαταγμένες σε ομόκεντρες περιφέρειες κύκλων γύρω από τον αγωγό. Οι δυναμικές γραμμές σε κάθε σημείο του αγωγού, βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο προς τον αγωγό.

Μιλούμε τότε για «**κυκλικό μαγνητικό πεδίο**» (circular magnetic field), σε αντίθεση με την περίπτωση του ραβδόμορφου ή πεταλοειδούς μαγνήτη, οπότε έχουμε «**διαμήκες μαγνητικό πεδίο**» (longitudinal magnetic field).

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος  $I$  και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης  $r$  από το κέντρο του αγωγού.

Όσον αφορά τη διεύθυνση και τη φορά του διανύσματος της έντασης του μαγνητικού πεδίου και εφόσον θεωρήσουμε σαν συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος από το (+) προς το (-), ισχύει ο κανόνας του δεξιόστροφου κοχλία.



**Εικόνα 5.6:** Κανόνας του δεξιόστροφου κοχλία

### 5.4.2 Μαγνητικό Πεδίο Σωληνοειδούς

Καλείται **σωληνοειδής** (solenoid) είτε ευθύγραμμο πηνίο, η διάταξη που λαμβάνουμε εάν περιτυλίξουμε αγωγό γύρω από ένα κύλινδρο.

Όταν διοχετεύσουμε ηλεκτρικό ρεύμα στον αγωγό, παράγεται μαγνητικό πεδίο με χαρακτηριστικά δίπολου, δηλαδή παρουσιάζονται δύο ετερόνυμοι μαγνητικοί πόλοι, όπως και στην περίπτωση του ραβδόμορφου μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο



του σωληνοειδούς προκύπτει από την πρόσθεση των μαγνητικών πεδίων που παράγονται σε κάθε σπείρα.

Εάν θεωρήσουμε τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος από το (+) στο (-), τότε, αναφορικά με τη διεύθυνση και φορά του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, ισχύει ο κανόνας της δεξιάς χειρός.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός μακρού σωληνοειδούς (μήκος τουλάχιστον πενταπλάσιο της διαμέτρου των σπειρών) είναι ανάλογη του αριθμού των σπειρών αλλά και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Πρακτικά, αύξηση της διαμέτρου του πηνίου συνεπάγεται ελάττωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

### **5.4.3 Ηλεκτρομαγνήτες**

Στο εσωτερικό ενός μακρού σωληνοειδούς εισάγουμε μία ράβδο (μαγνητικώς) μαλακού σιδήρου. Εάν διοχετεύσουμε ρεύμα στον αγωγό του σωληνοειδούς, η ράβδος μαγνητίζεται ισχυρά λόγω μαγνητικής επαγωγής, παρουσιάζοντας πόλους στα σημεία των πόλων του σωληνοειδούς. Η διάταξη αυτή αποτελεί ένα ηλεκτρομαγνήτη. Η μαγνήτιση του μαλακού σιδήρου είναι παροδική και διαρκεί όσο και η διέλευση του ρεύματος.

Η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη του ηλεκτρικού ρεύματος, του αριθμού των σπειρών του πηνίου και της μαγνητικής διαπερατότητας του σιδήρου.

Εάν, αντί για μαλακό σίδηρο, τοποθετήσουμε στο εσωτερικό του πηνίου ένα σιδηρομαγνητικά σκληρό υλικό (π.χ. χάλυβα υψηλού άνθρακα), τότε αυτό μετατρέπεται σε μόνιμο μαγνήτη.

### **5.4.4 Εναλλασσόμενο και Συνεχές Ρεύμα**

Εάν η ένταση, η τάση και η φορά του ρεύματος παραμένουν σταθερές, τότε το ρεύμα ονομάζεται συνεχές (DC). Συνεχές ρεύμα παράγεται από μπαταρίες (είτε με ανόρθωση εναλλασσόμενου).

Όμως, τόσο στις βιομηχανικές όσο και στις οικιακές εφαρμογές, το ρεύμα που συνήθως χρησιμοποιούμε είναι εναλλασσόμενο (AC) ημιτονοειδούς μορφής.

Μπορούμε να αποκόψουμε το αρνητικό μέρος του ρεύματος, οπότε μιλούμε για ημιανορθωμένο ρεύμα μιας φάσεως (HalfWave AC, HWAC).

Μπορούμε επίσης να ανορθώσουμε το αρνητικό μέρος, κάνοντας το θετικό, οπότε μιλούμε για πλήρως ανορθωμένο ρεύμα μιας φάσεως (FullWave AC, FWAC).

Μπορούμε επίσης να ανορθώσουμε το αρνητικό μέρος και των τριών φάσεων του τριφασικού ρεύματος, οπότε μιλούμε για πλήρως ανορθωμένο ρεύμα τριών φάσεων (Full Wave DC, FWDC), το οποίο μοιάζει αρκετά με το συνεχές.

Σημείωση: Η μαγνήτιση ενός αγωγού εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της έντασης  $I$  του ρεύματος. Εφόσον χρησιμοποιείται DC, η ένδειξη του αμπερόμετρου δείχνει αυτή τη μέγιστη τιμή.

Στην περίπτωση όμως χρησιμοποίησης AC, τα αμπερόμετρα είναι συνήθως τύπου RMS (root mean square) και δείχνουν την ενεργό τιμή, όπου:

$$I_{en} = 0,707 \times I_{max} \quad (5.17)$$

και άρα η μέγιστη τιμή (peak) ισούται προς την ανάγνωση του αμπερόμετρου πολλαπλασιασμένη επί τετραγωνική ρίζα του 2.

#### 5.4.5 Επιδερμικό Φαινόμενο

Στην περίπτωση ενός πηνίου, ο συνδυασμός του εναλλασσόμενου ρεύματος και της αυτεπαγωγής του πηνίου δημιουργεί το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) στο υλικό που μαγνητίζεται, δηλ. η μαγνητική ροή είναι πολύ ισχυρότερη στην εξωτερική επιφάνεια του υλικού.

Το ημιανορθωμένο ρεύμα παρουσιάζει λιγότερο έντονο επιδερμικό φαινόμενο και επομένως μεγαλύτερη διείσδυση της μαγνήτισης ενώ το συνεχές δίνει τη μέγιστη διείσδυση.

Γενικά, κατά τη μαγνήτιση με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, η μαγνητική επαγωγή έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή κοντά στην επιφάνεια (επιδερμίδα) του υλικού, ενώ με ημιανορθωμένο ή συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη διείσδυση της μαγνήτισης στο εσωτερικό της διατομής του υλικού.

## 5.5 ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

### 5.5.1 Καμπύλη Μαγνήτισης

Εάν πάρουμε ένα δοκίμιο από σίδηρο που μαγνητίζεται για πρώτη φορά (είτε έχει απομαγνητιστεί τελείως) και το τοποθετήσουμε σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως  $H$  (A/m) στο SI, Oersted στο ΗΜΣ), τότε παρουσιάζεται μαγνητική επαγωγή  $B$  μέσα σε αυτό (Tesla είτε  $Wb/m^2$  στο SI, Gauss στο ΗΜΣ).

Ο λόγος  $B/H$  εκφράζει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (Henry στο SI). Αυξάνουμε την ένταση της μαγνητίζουσας δύναμης  $H$  και καταγράφουμε στο διάγραμμα  $B-H$  την επαγωγή  $B$ . Η μαγνητική διαπερατότητα, κάθε στιγμή, εκφράζεται από την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην εφαπτομένη στη σχηματιζόμενη καμπύλη και την παράλληλη στον άξονα  $H$ .

$$(efa = \Delta B / \Delta H = m) \quad (5.18)$$

Παρατηρούμε ότι η μαγνητική διαπερατότητα αρχικά αυξάνεται και κατόπιν ελαττώνεται, όσο αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Εάν αυξήσουμε και άλλο την ένταση  $H$ , θα παρατηρήσουμε ότι φθάνουμε σε ένα σημείο όπου η μαγνητική διαπερατότητα γίνεται ίση με αυτήν του κενού ή του αέρα:

$$(m = 4\pi \times 10^{-7} H / m) \quad (5.19)$$

στο SI,  $\mu=1G/Oe$  στο ΗΜΣ είτε ότι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα γίνεται ίση με τη μονάδα.

Τότε λέμε ότι το υλικό δεν μπορεί να μαγνητιστεί περαιτέρω, με την έννοια ότι δεν μπορεί να συγκεντρώσει επιπλέον δυναμικές γραμμές στο εσωτερικό του, σε σχέση με αυτές έξω από το υλικό.

Το αντίστοιχο σημείο της καμπύλης ονομάζεται «**σημείου μαγνητικού κόρου**» είτε «**σημείο κορεσμού**» (saturation point). Σ' αυτό το σημείο θεωρούμε ότι όλα τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα του υλικού έχουν ευθυγραμμιστεί με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και όλες οι μαγνητικές περιοχές έχουν καταλήξει σε μία, καταλαμβάνοντας ολόκληρο το δοκίμιο.

Η Καμπύλη από το σημείο  $O$  έως το σημείο  $S$  ονομάζεται «παρθενική καμπύλη μαγνήτισης» (virgin curve).

Εάν τώρα ελαττώσουμε την ένταση της μαγνητίζουσας δύναμης  $H$ , ελαττώνεται και η μαγνητική επαγωγή  $B$ , παρουσιάζοντας όμως υστέρηση σε σχέση με την

αρχική καμπύλη και διαγράφοντας μια νέα καμπύλη. Το φαινόμενο καλείται «**μαγνητική υστέρηση**» (magnetic hysteresis).

Όταν μηδενιστεί η ένταση  $H$ , στο υλικό παραμένει μαγνητική επαγωγή  $B$  που ονομάζεται «**παραμένουσα μαγνήτιση**» (residual magnetism).

Εάν τώρα εφαρμόσουμε μία αντίθετη μαγνητίζουσα δύναμη  $H$ , η επαγωγή  $B$  ελαττώνεται περαιτέρω, έως ότου μηδενιστεί. Τότε, η αντίστοιχη ένταση  $H$  ονομάζεται «**συνεχούσα δύναμη**» (coercive force), είτε «**συνεκτικό πεδίο**». Αυξάνοντας και άλλο την (αντίθετης φοράς από την αρχική) ένταση  $H$ , αυξάνεται και η (αντίθετη) επαγωγή  $B$ , έως ότου φθάσουμε στο σημείο κορεσμού της αντίθετης πολικότητας.

Εάν, από το σημείο αυτό και μετά, αρχίσουμε να ελαττώνουμε την ένταση  $H$  έως ότου μηδενιστεί, έχουμε πάλι το φαινόμενο της υστέρησης, με παραμένουσα μαγνήτιση αντίθετης πολικότητας.

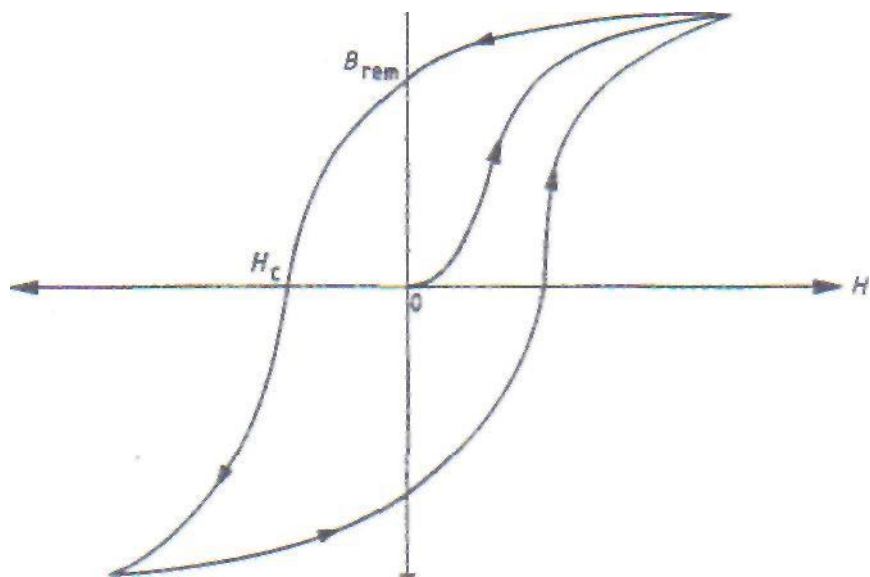
Συνεχίζουμε εφαρμόζοντας μαγνητίζουσα δύναμη με φορά ίδια με την αρχική και, αφού μηδενιστεί η επαγωγή  $B$  όταν η ένταση  $H$  γίνει ίση με τη συνέχουσα δύναμη, καταλήγουμε στο αρχικό σημείο κορεσμού.

Το κλειστό σχήμα που δημιουργήσαμε κατ' αυτόν τον τρόπο ονομάζεται «**βρόχος υστέρησης**» (hysteresis loop) είτε βρόχος μαγνήτισης.

Εάν επαναλάβουμε το πείραμα θα πάρουμε και πάλι την ίδια κλειστή καμπύλη μαγνήτισης.

Εάν κάνουμε σειρά ίδιων πειραμάτων με διαφορετικά υλικά, θα δούμε ότι τα μαγνητικώς μαλακά έχουν λεπτό και όρθιο βρόχο (μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, μικρή παραμένουσα μαγνήτιση - μικρή συγκρατησιμότητα, μικρό συνεκτικό πεδίο). Αντίθετα, τα μαγνητικώς σκληρά υλικά έχουν φαρδύ και πλαγιαστό βρόχο (μικρή μαγνητική διαπερατότητα, μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση - μεγάλη συγκρατησιμότητα, μεγάλο συνεκτικό πεδίο).

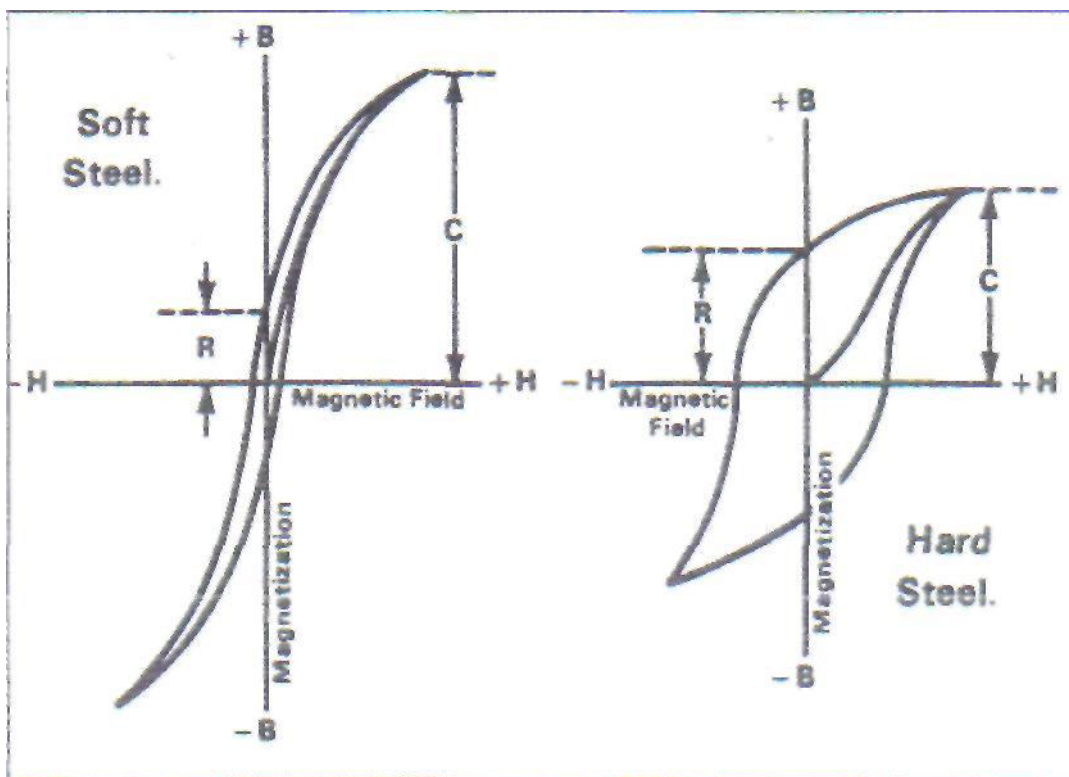
Saturation induction M



**Εικόνα 5.7:** Βρόχος Υστέρησης Φερριτικού Χάλυβα

$B_{rem}$ = Παραμένουσα Μαγνήτιση

$H_c$ = Συνέχουσα Δύναμη (Συνεκτικό Πεδίο)



**Εικόνα 5.8:** Βρόχος Μαγνήτισης

Αριστερά: Μαλακός Χάλυβας

Δεξιά: Σκληρός Χάλυβας

### 5.5.2 Διαρροή του Μαγνητικού Πεδίου

Εάν μαγνητίσουμε ένα δοκίμιο, γνωρίζουμε ότι μέσα σε αυτό υπάρχει ένας αριθμός δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας ανάλογος με την μαγνητιζουσα δύναμη  $H$  και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού:

$$B = \mu \times H \quad (5.20)$$

Ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο έξω από το υλικό, όπου η μαγνητική διαπερατότητα είναι κατά πολύ μικρότερη. Όπως είδαμε, τούτο συμβαίνει διότι όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό τεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε οι δυναμικές γραμμές του πεδίου διαταράσσονται και μεγάλος αριθμός τους εισέρχεται μέσα στο υλικό.

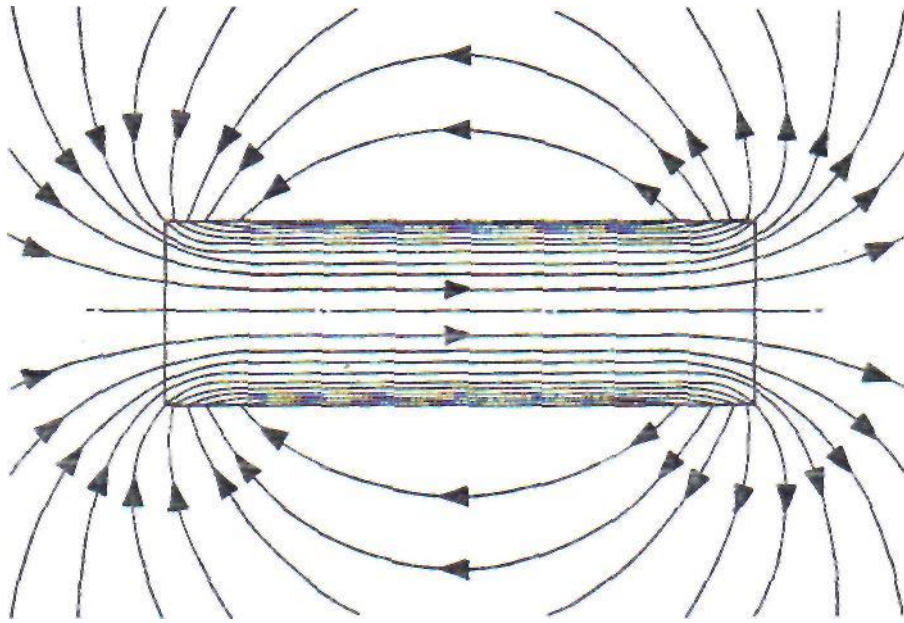
Εάν ρίξουμε ρινίσματα μαλακού σιδήρου πάνω στο δοκίμιο, τότε αυτά θα συγκεντρωθούν μόνο επάνω στους πόλους, εκεί δηλαδή όπου οι δυναμικές γραμμές εισέρχονται ή εξέρχονται από το δοκίμιο.

Εάν όμως το δοκίμιο έχει μία ασυνέχεια (π.χ. ρήγμα) κάθετη στις δυναμικές γραμμές, το κενό ή ο αέρας (ή άλλο μη σιδηρομαγνητικό υλικό) που βρίσκεται στην ασυνέχεια δεν μπορεί να «παραλάβει» το σύνολο των δυναμικών γραμμών που υπάρχουν στο σιδηρομαγνητικό υλικό. Έτσι υπάρχει και πάλι διατάραξη του μαγνητικού πεδίου, με τις δυναμικές γραμμές να «απλώνονται» στο χώρο γύρω από την ασυνέχεια, ώστε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μέσα στην ασυνέχεια να γίνει αυτή που επιτρέπει η μαγνητική της διαπερατότητα.

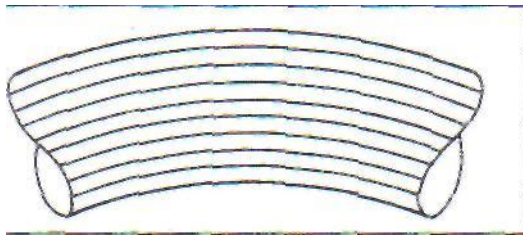
Επομένως, οι δυναμικές γραμμές εξέρχονται αρχικά από το δοκίμιο, δημιουργώντας έναν τοπικό βόρειο μαγνητικό πόλο. Μετά την ασυνέχεια το υλικό τις συγκεντρώνει και πάλι, δημιουργώντας έτσι ένα τοπικό νότιο μαγνητικό πόλο.

Το φαινόμενο αυτό καλείται «**διαρροή της μαγνητικής ροής**» (magnetic flux leakage) και το τοπικό μαγνητικό πεδίο «**πεδίο διαρροής**» (leakage field) ή «**διαρρέον μαγνητικό πεδίο**».

Εάν τώρα ρίξουμε ρινίσματα μαλακού σιδήρου πάνω στο δοκίμιο και εφόσον το διαρρέον μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, αυτά θα συγκεντρωθούν πάνω στους τοπικούς πόλους. Προκειμένου για ένα ρήγμα που το πλάτος του είναι πολύ μικρό (της τάξεως μερικών δεκάδων χιλιοστών του χιλιοστού του μέτρου - μικρών  $\mu\text{m}$ ), η ένδειξη που θα σχηματιστεί θα είναι μία γραμμή από ρινίσματα σιδήρου, κατά μήκος του ρήγματος.



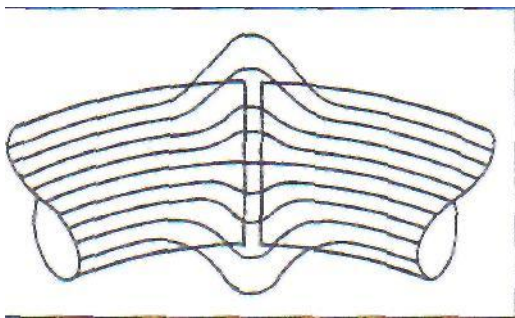
**Εικόνα 5.9:** Μαγνητικές Δυναμικές Γραμμές



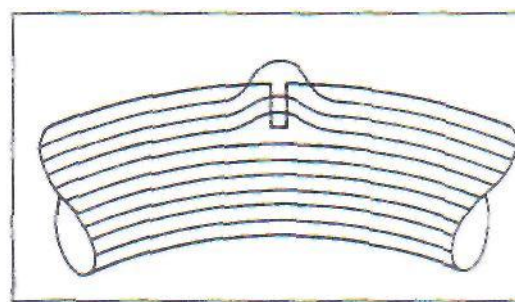
**Εικόνα 5.10:** Δοκίμιο χωρίς ασυνέχειες



**Εικόνα 5.11:** Ασυνέχεια

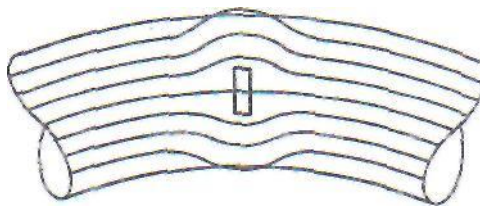


**Εικόνα 5.12:** Δοκίμιο με διαμπερές ρήγμα



παράλληλη στις γραμμές

**Εικόνα 5.13:** Δοκίμιο με επιφανειακή ασυνέχεια



**Εικόνα 5.14:** Δοκίμιο με υποεπιφανειακή ασυνέχεια

### 5.5.3 Ιστορικό της μεθόδου Μαγνητικών Σωματιδίων

Λίγο μετά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο ο William E. Hoke παρατήρησε ενδείξεις μεταλλικών ρινισμάτων που αντιστοιχούσαν σε επιφανειακά ρήγματα, στην περίπτωση κατεργασίας αξόνων από σκληρό χάλυβα που η συγκράτησή τους στον τόρνο γινόταν με μαγνητικά μέσα (μαγνητικά τσόκ). Τα ρινίσματα προέρχονταν από την ίδια την κατεργασία τόννευσης.

Στο τέλος της δεκαετίας του 1920 ο A.V.de Forest προσπάθησε να αξιοποιήσει πρακτικά την ανωτέρω παρατήρηση, προκειμένου να αναπτύξει μια νέα βιομηχανική μέθοδο ανίχνευσης ασυνεχειών. Υπόψιν ότι, την εποχή εκείνη, η μόνη μέθοδος Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών (ΜΚΔ) που είχε βιομηχανική εφαρμογή ήταν η Ραδιογραφία. Η προσπάθεια συνεχίστηκε από τους A.V.de Forest και F.B.Doane όταν δημιούργησαν την Magnaflux Corporation (αρχές της δεκαετίας 1930) και συνεχίστηκαν με τη συμβολή του C.E.Betz, όταν αυτός άρχισε να εργάζεται για την ανωτέρω εταιρεία. Ωστόσο, η ευρεία βιομηχανική εφαρμογή της μεθόδου δεν άρχισε παρά στις αρχές του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου.

Σημείωση: Τα ανωτέρω βασίζονται αποκλειστικά σε όσα ο C.E.Betz παραθέτει στο βιβλίο του "Principle of Magnetic Testing", έκδοση της Magnaflux.

## 5.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

### 5.6.1 Πλεονεκτήματα

1. Η πλέον κατάλληλη και ευαίσθητη μέθοδος εντοπισμού επιφανειακών ασυνεχειών. Είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητη από τα Διεισδυτικά Υγρά και ελαφρά περισσότερο ευαίσθητη από τα Δινορρέυματα.
2. Γρήγορη και απλή στην εφαρμογή της.



3. Οι ενδείξεις είναι σαν ένας μαγνητικός χάρτης των ασυνεχειών.
4. Οι χρήστες μπορούν να μάθουν εύκολα την μέθοδο.
5. Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος και στο σχήμα του προς έλεγχο κομματιού.
6. Εντοπίζει ασυνέχειες που είναι γεμάτες από ξένα σώματα (σε αντίθεση με τα Διεισδυτικά Υγρά).
7. Δεν χρειάζεται επιμελής προκαθαρισμός.
8. Δεν υπάρχει πρόβλημα από τυχόν επικαλύψεις βαφών ή μη μαγνητικών επιστρώσεων, προκειμένου για μικρά πάχη (πρακτικά έως 0.3 mm, ενίοτε και περισσότερο).
9. Είναι εξαιρετικά επιδεκτική στην αυτοματοποίηση.
10. Είναι σχετικά φθηνή μέθοδος.
11. Σε σχέση με τα Διεισδυτικά Υγρά, είναι ευκολότερη και γρηγορότερη μέθοδος (με εξαίρεση πολύ μεγάλες επιφάνειες) και με λιγότερους κινδύνους υγιεινής.
12. Μπορεί να εντοπίσει ασυνέχειες μη ανοικτές στην επιφάνεια αλλά και ελαφρά υπο-επιφανειακές.

### **5.6.2 Περιορισμοί**

1. Εφαρμόζεται μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά.
2. Δεν μπορεί να εντοπίσει ασυνέχειες που είναι βαθιά υπο-επιφανειακές.
3. Απαιτεί δύο τουλάχιστον μαγνητίσεις διαφορετικού προσανατολισμού.
4. Πολλές φορές χρειάζεται απομαγνήτιση, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου.
5. Πολλές φορές απαιτούνται ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα, για μεγάλα χυτά και σφυρήλατα.
6. Απαιτείται προσοχή για την αποφυγή καψιμάτων και υπερθέρμανσης στα σημεία επαφής.
7. Σε μεγάλους αριθμούς μικρών κομματιών είναι χρονοβόρα η ατομική μαγνήτιση, όπως και στην περίπτωση πολύ μεγάλων επιφανειών ή μηκών.

8. Απαιτείται γνώση και εμπειρία για την ερμηνεία των ενδείξεων (όχι όμως τόσο στην περίπτωση της ραδιογραφίας, των υπερήχων και των δινορρευμάτων).

### 5.6.3 Ανιχνευσιμότητα Ασυνεχειών

Την ευαισθησία της μεθόδου Μαγνητικών Σωματιδίων επηρεάζει πλήθος παραγόντων, όπως η χρησιμοποιούμενη μέθοδος και τεχνική, το είδος και οι ιδιότητες των σωματιδίων και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Συνήθως απαιτείται σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου τουλάχιστον ίση με 250 (και για καλή ευαισθησία άνω του 500) ενώ συχνά αυτή λαμβάνει τιμές άνω του 1500.

Όσον αφορά τις ίδιες τις ασυνέχειες, υπάρχει επίσης σειρά παραγόντων που καθορίζουν την ανιχνευσιμότητά τους. Κατωτέρω παραθέτουμε τους κυριότερους:

α) Το μέγεθος, το σχήμα και ο προσανατολισμός της ασυνέχειας. Είναι σημαντικό να διακόπτεται μεγάλος αριθμός δυναμικών γραμμών, ώστε το διαρρέον μαγνητικό πεδίο να είναι αρκετά ισχυρό. «Ευνοούνται» ασυνέχειες με μεγάλο μήκος, επιμήκεις (μεγάλου λόγου ύψους προς πλάτος) και τοποθετημένες υπό ορθή γωνία προς τη διεύθυνση του πεδίου. Επίσης ασυνέχειες μεγάλου ύψους (βαθείς).

β) Το άνοιγμα της ασυνέχειας στην επιφάνεια, το οποίο δεν πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο. «Στενές» ασυνέχειες παράγουν ισχυρότερη ένδειξη.

γ) Η αιχμηρότητα των άκρων της ασυνέχειας, ιδιαίτερα προκειμένου για υποεπιφανειακές ασυνέχειες. «Ευνοούνται» ασυνέχειες αιχμηρών άκρων παρά στρογγυλεμένων.

δ) Το βάθος της ασυνέχειας, κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (προκειμένου για υποεπιφανειακές ασυνέχειες), παρότι δεν είναι ο κρισιμότερος παράγοντας.

ε) Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που περιέχουν (ευνοούνται ασυνέχειες με παραμαγνητικό ή διαμαγνητικό υλικό).

## 5.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

### 5.7.1 Μέθοδοι ελέγχου με Μαγνητικά Σωματίδια

Η μέθοδος ελέγχου με Μαγνητικά (η μαγνητιζόμενα) Σωματίδια (Magnetic Particle Testing) βασίζεται στις εξής αρχές:

- Μαγνήτιση του δοκιμίου που θα ελεγχθεί
- Εφαρμογή μαγνητικών σωματιδίων
- Σχηματισμός ένδειξης στη θέση διαρροής του μαγνητικού πεδίου

Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί πολλές επιμέρους τεχνικές, ανάλογα με τον τρόπο μαγνήτισης, τον τρόπο εφαρμογής αλλά και το είδος των μαγνητικών σωματιδίων.

### 5.7.2 Παραμένουσα και Συνεχής Μέθοδος

Η **παραμένουσα μέθοδος** (residual method) βασίζεται στο παραμένουσα μαγνήτιση, μετά την απομάκρυνση της μαγνητιζουσας δύναμης (ή, γενικότερα, του αιτίου μαγνήτισης) και εφαρμόζεται μόνο σε μαγνητικώς σκληρά υλικά.

Το δοκίμιο που θα ελεγχθεί πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη συγκρατησιμότητα και τα μαγνητικά σωματίδια εφαρμόζονται μετά την αφαίρεση της μαγνητιζουσας δύναμης.

Παρότι η παραμένουσα μέθοδος είναι σχετικά απλή, εκτός από τον περιορισμό των υλικών στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί (κυρίως σκληροί χάλυβες), παρουσιάζει σαφώς μειωμένη ευαισθησία σε σχέση με τη συνεχή μέθοδο και απαιτεί πολύ μεγαλύτερες τιμές μαγνητιζουσας δύναμης (ιδίως για υποεπιφανειακές ασυνέχειες).

Κατά τη **συνεχή μέθοδο** (continuous method) στο δοκίμιο εφαρμόζεται μαγνητιζουσα δύναμη ενόσω υπάρχουν επάνω του μαγνητικά σωματίδια (δηλαδή τα μαγνητικά σωματίδια εφαρμόζονται είτε αμέσως πριν είτε κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης).

Η συνεχής μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από την παραμένουσα, απαιτεί μικρότερες τιμές μαγνητιζουσας δύναμης και πολύ μικρότερους χρόνους μαγνήτισης (συνήθως μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου, για κάθε ένα από τα λίγα αλληπάλληλα «σοκ» που απαιτούνται).

### 5.7.3 Διαμήκης και Κυκλική Μαγνήτιση

Υπάρχουν δύο κυρίως είδη μαγνητικού πεδίου:

α) Το «**διαμήκης**» (longitudinal), όπου οι δυναμικές γραμμές σχηματίζουν κλειστό βρόχο εξερχόμενες από το δοκίμιο στο βόρειο μαγνητικό πόλο και εισερχόμενες πάλι σ' αυτό στο πόλο.

β) Το «**κυκλικό**» (circular), στο οποίο οι δυναμικές γραμμές σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους, χωρίς να υπάρχουν μαγνητικοί πόλοι.

Τα δύο είδη πεδίου δεν είναι δυνατόν να συνυπάρχουν. Εάν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί κατά το ένα πεδίο και εφαρμοστεί μαγνητίζουσα δύναμη του άλλου πεδίου, εάν μεν η μαγνήτιση είναι λιγότερο ισχυρή από την υπάρχουσα, το πρώτο πεδίο εξακολουθεί να υπάρχει ενώ δεν εμφανίζεται καθόλου το δεύτερο. Αν όμως είναι ισχυρότερη, τότε το πρώτο αναιρείται και υπάρχει μόνο το δεύτερο.

Εάν εφαρμοστούν διαδοχικά μαγνητίσεις του ίδιου είδους πεδίου, επειδή η μαγνητική επαγωγή είναι διανυσματικό μέγεθος, το συνισταμένο πεδίο ταυτίζεται με το διάνυσμα της συνισταμένης των δύο μαγνητικών επαγωγών. Εξαίρεση της συνύπαρξης των δύο διαφορετικών πεδίων είναι η περίπτωση ταυτόχρονης μαγνήτισης με κυκλικό και διαμήκης πεδίο. Τότε παράγεται μια σύνθετη μαγνητική επαγωγή ίση κατά διεύθυνση, φορά και μέγεθος με το διανυσματικό άθροισμα των δύο επαγωγών.

Η κυκλική μαγνήτιση έχει το πλεονέκτημα, έναντι της διαμήκου, ότι δεν παράγει πόλους (σε ιδανικές καταστάσεις) και επομένως δεν εμφανίζει συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων, που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα ερμηνείας.

Η μέγιστη διαρροή μαγνητικού πεδίου παρουσιάζεται όταν η τυχόν ασυνέχεια είναι κάθετη προς τις δυναμικές γραμμές, δηλ. κάθετη προς τη διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής. Πρακτικά μπορούν να ανιχνευθούν ασυνέχειες με γωνία  $90^\circ$  έως  $45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση του πεδίου. Επομένως είναι απαραίτητη η μαγνήτιση σε δύο κάθετες διευθύνσεις, προκειμένου να ανιχνευθούν ασυνέχειες οποιασδήποτε διεύθυνσης. Έτσι, συχνά επιλέγεται πρώτα μία κυκλική μαγνήτιση και, μετά τον πρώτο έλεγχο, μία διαμήκης, για να ανιχνευθούν και ασυνέχειες της άλλης διεύθυνσης.

#### 5.7.4 Υγρή και Ξηρή Μέθοδος

Τα μαγνητικά (μαγνητιζόμενα) σωματίδια είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ως έχουν, δηλ. ως ξηρή σκόνη - ρινίσματα, οπότε μιλούμε για «**ξηρή μέθοδο**» (dry method).

Είναι όμως δυνατόν να βρίσκονται μέσα σε υγρό φορέα (συνήθως πετρελαιοειδές / λάδι είτε νερό), οπότε μιλούμε για «**υγρή μέθοδο**» (wet method) . Αντίστοιχα, μιλούμε για «**ξηρή σκόνη/πούδρα**» (dry powder) ή για «**μαγνητική μελάνη**» (magnetic ink).

Η υγρή μέθοδος είναι, εν γένει, περισσότερο ευαίσθητη από την ξηρή, διότι παρέχει πρακτικά μεγαλύτερη δυνατότητα «**κινητικότητας**» (mobility) στα σωματίδια, πάνω στο δοκίμιο. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις (π.χ. έλεγχος συγκολλήσεων με ακροδέκτες και ημιανορθωμένο ρεύμα) όπου προτιμάται η ξηρή.

Τα ξηρά μαγνητιζόμενα σωματίδια εφαρμόζονται με κατάλληλα μέσα, όπως φούσκες (bulbs) ή πιστόλια πεπιεσμένου αέρα. Η ιδανική εφαρμογή θα ήταν να φθάνουν στο δοκίμιο σαν ένα ομοιόμορφο νέφος και με ελάχιστη ταχύτητα.

Στην υγρή μέθοδο χρησιμοποιείται έγχυση, εμβάπτιση ή ψεκασμός. Εάν ο υγρός φορέας είναι νερό (φθηνότερο και ασφαλέστερο από τα πετρελαιοειδή), συνήθως απαιτούνται αντιδιαβρωτικά πρόσθετα, διαβρεκτικοί παράγοντες (wetting agent), πρόσθετα για το μη σχηματισμό αφρού (antifoaming) και άλλα υλικά ειδικής χρησιμότητας. Η χρήση εναλλασσόμενου ή ημιανορθωμένου ηλεκτρικού ρεύματος, για την μαγνήτιση του δοκιμίου, προσφέρει μεγαλύτερη κινητικότητα στα μαγνητιζόμενα σωματίδια επάνω στο δοκίμιο, προκειμένου να σχηματιστεί ένδειξη. Έτσι, πρακτικά ποτέ δεν χρησιμοποιούνται ξηρά σωματίδια με συνεχές ή πλήρως ανορθωμένο ρεύμα, διότι η κινητικότητα τους πάνω στο δοκίμιο θα ήταν απαγορευτικά μικρή.

Η ξηρή μέθοδος είναι η πρώτη που αναπτύχθηκε (Doane και de Forest, 1929) ενώ η υγρή άργησε να ακολουθήσει (μέσα της δεκαετίας 1930).

Η ξηρή μέθοδος είναι ιδανική για πλήρως υποεπιφανειακές ασυνέχειες και μάλιστα σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από μερικά χιλιοστά της ίντζας. Χρησιμοποιείται πάντα με AC είτε ημιανορθωμένο ρεύμα, για να παρέχεται καλύτερη κινητικότητα στα σωματίδια. Είναι απλούστερη (σε εξοπλισμό και τρόπο εφαρμογής) από την υγρή και δεν «λερώνει» τόσο όσο αυτή.

Αντίθετα, η υγρή μέθοδος (και μάλιστα με συνεχή μαγνήτιση και όχι παραμένουσα) είναι η πλέον ευαίσθητη, ιδιαίτερα για μικρές, λεπτές και αβαθείς ασυνέχειες. Η υγρή συνεχής μέθοδος με φθορίζοντα σωματίδια είναι η πλέον ευαίσθητη για ανίχνευση μικρών ρηγμάτων κόπωσης. Επίσης, η υγρή συνεχής μέθοδος απαιτεί μαγνήτιση για κλάσματα του δευτερολέπτου, ενώ η ξηρή μεγαλύτερης διάρκειας.

Ο φορέας των σωματιδίων στην υγρή μέθοδο είναι συνήθως παράγωγο απόσταξης πετρελαίου, με χαμηλό ιξώδες (βασικότατο χαρακτηριστικό), χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και υψηλού σημείου ανάφλεξης.

Το νερό χρησιμοποιείται επίσης, ιδίως σε περιπτώσεις κινδύνων ανάφλεξης του λαδιού, αφού εμπλουτιστεί με διαβρεκτικούς παράγοντες (wetting agent), αντιδιαβρωτικά υλικά, παράγοντες για το μη σχηματισμό αφρού και αρκετά άλλα, που βεβαίως ανεβάζουν πολύ το κόστος του.

Τα μαγνητιζόμενα σωματίδια της υγρής μεθόδου διατίθενται είτε σε μορφή πάστας (ιδιαίτερα στις ΗΠΑ) είτε σαν ξηρές σκόνες. Έχουν χρώμα μαύρο, κόκκινο ή φθορίζον. Προκειμένου για μικρές ποσότητες και για εργοταξιακές εφαρμογές, συνήθως διατίθενται υπό μορφή σπρέι.

Για μεγάλες όμως ποσότητες και για εργοστασιακή ή εργαστηριακή εφαρμογή, γίνεται παρασκευή του λουτρού, σύμφωνα με κατάλληλες προδιαγραφές. Το σημαντικότερο σημείο είναι η ποσότητα των στερεών σωματιδίων, πράγμα που ελέγχεται μέσω ογκομετρικού σωλήνα, όπου καθιζάνουν (Sutherland tube). Καθιζάνουν επίσης και οι τυχόν ακαθαρσίες και μάλιστα σαν ξεχωριστό επιπλέον στρώμα, οπότε εύκολα ελέγχεται η ποιότητα του λουτρού.

Είναι χαρακτηριστικό ότι η συγκέντρωση των φθορίζοντων σωματιδίων είναι πολύ μικρότερη (της τάξης του 1/10) από αυτή των ορατών, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης αντίθεσης και ευαισθησίας που προσφέρουν (και επομένως και του πολύ ισχυρού υποβάθρου). Εξάλλου, ακριβώς λόγω της μεγάλης ευαισθησίας και του ισχυρού υποβάθρου, δεν χρησιμοποιείται υγρή φθορίζουσα μέθοδος όταν αναζητούνται μεγάλες σχετικά ασυνέχειες είτε όταν υπάρχει βεβαιότητα εκτεταμένων μη σχετικών ενδείξεων (π.χ. ακατέργαστα χυτά, ατρόχιστες συγκολλήσεις κλπ).

### 5.7.5 Το Υλικό των Μαγνητιζόμενων Σωματιδίων

Τα μαγνητικά σωματίδια έχουν διάφορα σχήματα (κυρίως επιμήκη και σφαιρικά), διαστάσεις και χρώματα. Για κάθε εφαρμογή, είναι απόλυτα κρίσιμο το εύρος (και η αναλογία) των διαστάσεων αλλά και η αναλογία επιμηκών προς σφαιρικών σωματιδίων.

Οι ξηρές σκόνες περιέχουν αρκετά μεγαλύτερα μαγνητικά σωματίδια από ό,τι οι μελάνες και αποτελούνται κυρίως από επιμήκη σωματίδια.

Τα σωματίδια των μελανών έχουν μικρότερο εν γένει μέγεθος από ό,τι αυτά της ξηρής σκόνης και περιέχουν μεγαλύτερο αριθμό σφαιρικών σωματιδίων (για να διακόπτεται η «αλυσίδα» της ένδειξης, διότι τα επιμήκη σωματίδια, μαγνητιζόμενα, συμπεριφέρονται σαν μικροί ραβδόμορφοι μαγνήτες).

Τα άνω όρια μεγέθους των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται σε μελάνες είναι 40 έως 60 μικρά, ενώ υπάρχουν (σε μικρή αναλογία) και σωματίδια μήκους έως 1/8 του μικρού χιλιοστού του χιλιοστόμετρου).

Το ειδικό βάρος των μαγνητιζόμενων σωματιδίων κυμαίνεται μεταξύ 5 και 8 Kg/lt.

Τα μαγνητιζόμενα σωματίδια που χρησιμοποιούνται ως ξηρή σκόνη συνήθως προέρχονται από μαλακό σίδηρο ενώ αυτά της υγρής μεθόδου από οξειδία του σιδήρου.

Η μαγνητική διαπερατότητα των μαγνητιζόμενων σωματιδίων είναι αρκετά υψηλή, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί τον κύριο παράγοντα ευαισθησίας. Εξ άλλου, η μαγνητική διαπερατότητα κάθε υλικού εξαρτάται από την κατάσταση μαγνήτισης. Συνήθως, σαν τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας, για κάθε υλικό, δίνεται η μέγιστη, ενώ είναι σαφές ότι, στην περίπτωση των μαγνητιζόμενων σωματιδίων, μας ενδιαφέρει κυρίως η αρχική, διότι το διαρρέον μαγνητικό πεδίο είναι ασθενές. Συχνά, υλικά υψηλής μέγιστης διαπερατότητας παρουσιάζουν μικρότερη αρχική διαπερατότητα από άλλα υλικά, με σχετικά μικρότερη μέγιστη διαπερατότητα.

Όσον αφορά τη συνέχουσα δύναμη (συνεκτικό πεδίο) και τη συγκρατησιμότητα των μαγνητιζόμενων σωματιδίων, απαιτούνται χαμηλές τιμές για πολλούς και εύκολα κατανοητούς λόγους. Ωστόσο, μία μικρή τιμή συγκρατησιμότητας είναι επιθυμητή, τόσο στην ξηρή όσο και στην υγρή μέθοδο, προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη κινητικότητα των σωματιδίων.

### 5.7.6 Υγρή Συνεχής Μέθοδος

Κατά την **υγρή συνεχή μέθοδο** (continuous wet method), η μαγνητιζουσα δύναμη εφαρμόζεται ενόσω τα σωματίδια είναι επάνω στο δοκίμιο. Άρα, τα σωματίδια εφαρμόζονται είτε πριν είτε/και κατά τη μαγνήτιση, πάντως όμως ποτέ μετά τη λήξη της. Συνιστώνται πολύ μικροί χρόνοι μαγνήτισης (1/2 του δευτερολέπτου) και μερικά αλληπάλληλα «σοκ». Ένα ελαφρό φύσημα πάνω στο δοκίμιο και σε διεύθυνση διαγώνια προς το μαγνητικό πεδίο, μπορεί να βοηθήσει στο σχηματισμό της ένδειξης. Ένα δυνατό φύσημα βοηθά στο να γίνουν περισσότεροι έντονες και σταθερές οι ενδείξεις επιφανειακών ασυνεχειών.

Σημείωση: Από τα προηγούμενα προκύπτει και η τεχνική: «ρίχνω, πατώ/φυσώ», που μας θυμίζει τη σωστή σειρά των βημάτων: Ρίχνουμε μαγνητιζόμενα σωματίδια, πατούμε το διακόπτη του ρεύματος και, ταυτόχρονα με το πάτημα, φυσούμε πάνω στο δοκίμιο.

### 5.7.7 Μέθοδος Λάκας

Πρόκειται για μία παραλλαγή της υγρής μεθόδου. Τα σωματίδια βρίσκονται διασκορπισμένα σε λεπτόρρευστη λάκα, διαφανή είτε λευκή. Ψεκάζεται ή γίνεται επάλειψη ενός λεπτού στρώματος, το οποίο στεγνώνει πολύ γρήγορα. Συχνά η λάκα μπορεί να αποκολληθεί σαν φιλμ πλαστικού, και έτσι να υπάρξει μόνιμη καταγραφή της.

### 5.7.8 Ορατά και Φθορίζοντα Σωματίδια

Εν γένει, τα μαγνητιζόμενα σωματίδια που χρησιμοποιούνται τόσο στην ξηρή όσο και στην υγρή μέθοδο, έχουν επικαλυφθεί από τον κατασκευαστή με ορατή είτε φθορίζουσα βαφή. Το συνηθέστερο ορατό χρώμα είναι το μαύρο, αν και χρησιμοποιούνται (ιδίως στις ΗΠΑ) και γκρι, κίτρινα και κόκκινα σωματίδια. Ιδιαίτερα στην Ευρώπη, πριν από την εφαρμογή των ορατών σωματιδίων, συνηθίζεται να επικαλύπτεται το δοκίμιο με ένα λευκό υπόστρωμα (white contrast), προκειμένου να αυξηθεί η χρωματική αντίθεση των ενδείξεων.

Η αντίθεση ένδειξης-υποβάθρου γίνεται μέγιστη στην περίπτωση των φθορίζοντων μαγνητικών σωματιδίων. Απαιτείται βεβαίως **μαύρο φως** (black light, UV-A) για να ενεργοποιηθεί η φθορίζουσα βαφή, καθώς και συνθήκες σχετικού



σκότους κατά την εξέταση. Όμως, λόγω ακριβώς της μεγάλης αντίθεσης φωτεινής ένδειξης - σκοτεινού υποβάθρου, η ευαισθησία της μεθόδου είναι ασύγκριτα μεγαλύτερη από εκείνη των ορατών σωματιδίων. Ακριβώς γι' αυτό το λόγο (και παρότι η συγκέντρωση σωματιδίων στις φθορίζουσες μελάνες είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στις ορατές), η μέθοδος των φθοριζόντων μαγνητικών σωματιδίων εφαρμόζεται μόνο σαν υγρή μέθοδος και για την περίπτωση που αναζητούνται μικρές ασυνέχειες.

Παρότι υπάρχουν φθορίζουσες βαφές διαφόρων χρωμάτων, για ακόμη μεγαλύτερη ευαισθησία χρησιμοποιούνται βαφές που φθορίζουν στο πράσινο-κίτρινο χρώμα (μήκος κύματος περίπου 550-570 nm), όπου το ανθρώπινο μάτι είναι περισσότερο ευαίσθητο, σε συνθήκες σκότους.

### **5.7.9 Άμεση και Έμμεση Μαγνήτιση**

Μιλούμε για **άμεση μαγνήτιση** (direct magnetization) στην περίπτωση που παράγεται μαγνητική επαγωγή στο δοκίμιο λόγω ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο περνά μέσα σ' αυτό. Αντίθετα, στην **έμμεση μαγνήτιση** (indirect magnetization), το δοκίμιο τίθεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο που έχει δημιουργηθεί έξω από αυτό.

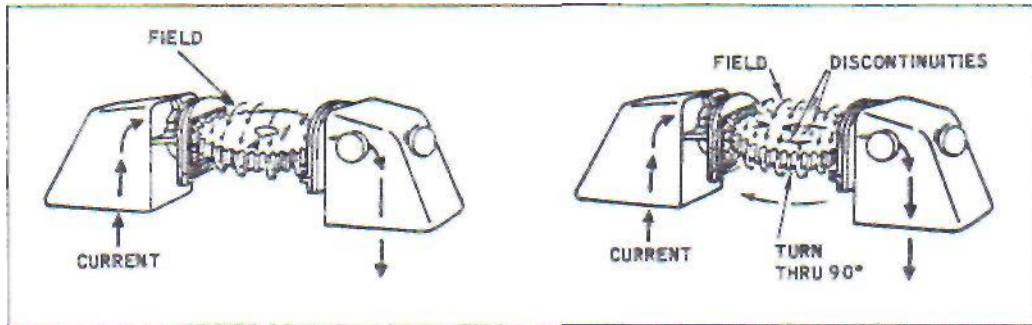
## **5.8 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ**

### **5.8.1 Μετωπική Επαφή**

Κατά τη μετωπική επαφή (headstock-tailstock) το δοκίμιο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα που εισέρχεται από το ένα άκρο του και εξέρχεται από το άλλο. Επάγεται κυκλικό μαγνητικό πεδίο με διεύθυνση κάθετη προς αυτή του ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, αφού ανιχνεύονται ασυνέχειες κάθετες προς τη διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής, η τεχνική αυτή καταδεικνύει ασυνέχειες παράλληλες και μέχρι γωνία 45° προς τη διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι αμερικάνικες προδιαγραφές συνήθως απαιτούν τουλάχιστον 800 Amps ρεύματος (peak) ανά ίντσα (25,4mm) διαμέτρου του δοκιμίου, αν και συχνά στην πράξη η τιμή αυτή υποδεικνύεται πολύ μεγάλη. Οι σχετικές βρετανικές προδιαγραφές απαιτούν 7,5 Amps ρεύματος (peak) ανά mm διαμέτρου του δοκιμίου, που αντιστοιχεί σε μαγνητική επαγωγή τουλάχιστον ίση με 0,72 Tesla, στην επιφάνεια του δοκιμίου.

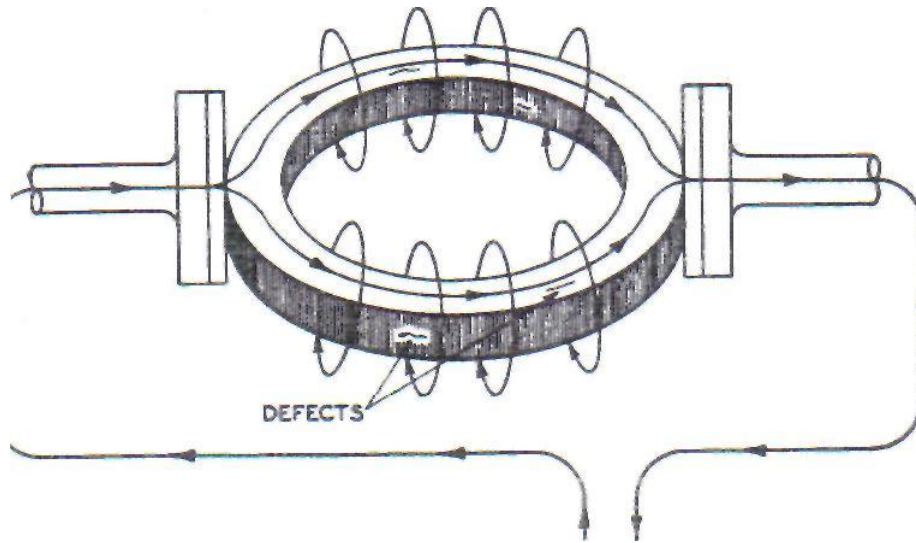
Η μετωπική επαφή συνιστάται κυρίως για επιμήκη δοκίμια και εφαρμόζεται σε ειδικές μονάδες πάγκου (bench unit). Χρησιμοποιείται AC για επιφανειακές ασυνέχειες και ημιανορθωμένο ή πλήρως ανορθωμένο ρεύμα για υποεπιφανειακές ασυνέχειες.



**Εικόνα 5.15:** Τεχνική Μετωπικής Επαφής

## CIRCULAR MAGNETIC FIELD

/ \



## MAGNETIC CURRENT

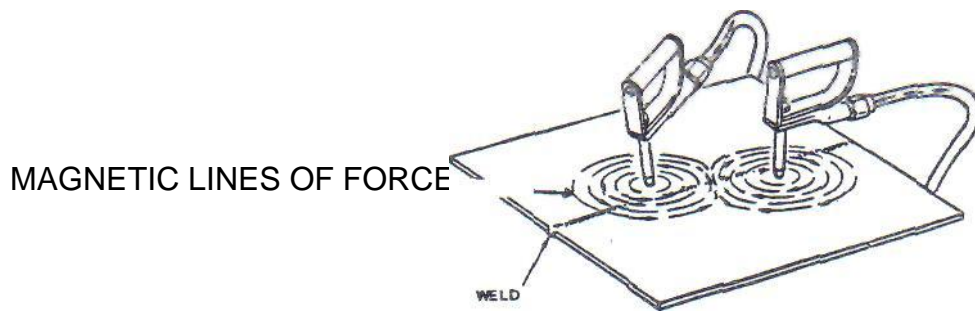
**Εικόνα 5.16:** Άμεση μαγνήτιση με μετωπική επαφή ενός δακτυλιοειδούς δοκιμίου

### 5.8.2 Χρήση Ακροδεκτών

Οι **ακροδέκτες** (rods) χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλα δοκίμια, αλλά και στην περίπτωση ελέγχου συγκολλήσεων (συνήθως με ξηρή μέθοδο και ημιανορθωμένο ρεύμα). Παράγονται δύο κυκλικά μαγνητικά πεδία με δυναμικές γραμμές ομόκεντρους κύκλους, γύρω από το σημείο επαφής καθενός ακροδέκτη.

Συχνά απαιτείται ρεύμα 100 Amps (peak) ανά ίντσα απόστασης ακροδεκτών. Ανιχνεύονται ασυνέχειες παράλληλες (και έως 45°) ως προς την ευθεία των ακροδεκτών. Προκειμένου για μεγάλα χυτά ή σφυρήλατα δοκίμια, κατασκευάζονται αυτοματοποιημένες διατάξεις με πολλούς ακροδέκτες που ενεργοποιούνται διαδοχικά για σύντομο χρονικό διάστημα (κλάσματα του δευτερολέπτου), ενώ η έγχυση των (υγρών συνήθως) μαγνητιζόμενων σωματιδίων έχει προηγηθεί (ο verall method). Χρησιμοποιείται είτε ημιανορθωμένο είτε πλήρως ανορθωμένο ρεύμα.

Σημείωση: Οι τιμές ρεύματος συνθηκών μαγνήτισης που αναφέρθηκαν είτε αναφέρονται στη συνέχεια είναι απλά ενδεικτικές και είναι απαραίτητο να ανατρέχει κανείς στην εφαρμοστέα προδιαγραφή, για τις ακριβείς απαιτήσεις. Εννοούνται πάντοτε ως μέγιστες τιμές (peak value), ανεξάρτητα από τη μορφή του ρεύματος (DC, HW είτε AC).



**Εικόνα 5.18:** Ακροδέκτες

## 5.9 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΜΜΕΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

### 5.9.1 Χρήση Μόνιμου Μαγνήτη

Ένας **μόνιμος μαγνήτης** (permanent magnet) μπορεί να επάγει διαμήκες μαγνητικό πεδίο σε ένα δοκίμιο (είτε σε ένα μέρος του).

Παρότι η χρήση μόνιμων μαγνητών δεν συνιστάται από τις περισσότερες προδιαγραφές των ΗΠΑ, οι ευρωπαϊκές συνήθως την επιτρέπουν, καθότι είναι η μόνη τεχνική που δεν δημιουργεί κινδύνους ανάφλεξης (λόγω χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος) σε πολύ επικίνδυνους χώρους. Συνήθως, απαιτείται ανυψωτική δύναμη 18 Kg (40 lbs) για τη μέγιστη απόσταση μεταξύ πόλων.

Εφόσον οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται από τον ένα πόλο προς τον άλλο, τα ανιχνευόμενα σφάλματα έχουν γωνία 45° έως 90° προς αυτή τη διεύθυνση.

Μόνιμοι μαγνήτες έχουν συνήθως πεταλοειδές σχήμα με σπαστούς βραχίονες, ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί η απόσταση μεταξύ των πόλων.

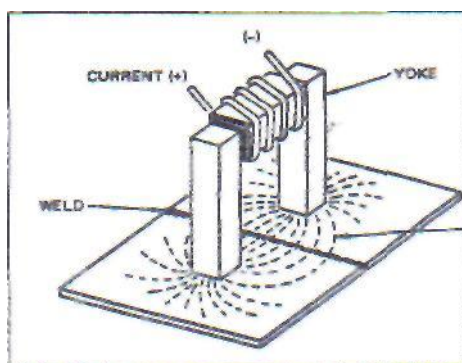
### 5.9.2 Πεταλοειδής Ηλεκτρομαγνήτης

Το συνηθέστερο μέσο μαγνήτισης είναι οι πεταλοειδείς ηλεκτρομαγνήτες (yoke). Έχουν σπαστούς βραχίονες (συνήθως με δύο αρθρώσεις έκαστος) ώστε να μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των πόλων αλλά και να μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία που δε βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Οι δυναμικές γραμμές οδεύουν από πόλο προς πόλο του yoke και οι ανιχνευόμενες ασυνέχειες έχουν διεύθυνση 45° έως 90° ως προς τη γραμμή που ενώνει τους πόλους.

Ο ηλεκτρομαγνήτης αποτελείται από ένα πηνίο με πυρήνα μαλακού σιδήρου. Ορισμένες φορές υπάρχει ρύθμιση της έντασης του ρεύματος, άρα και της μαγνητικής ροής.

Συχνά απαιτείται ανυψωτική δύναμη 4.5 Kg για ηλεκτρομαγνήτες AC και 18 Kg (40 lbs) για ηλεκτρομαγνήτες DC ή πλήρως ανορθωμένου ρεύματος.



**Εικόνα 5.19:** Ακροδέκτες

### 5.9.3 Χρήση Πηνίου

Γνωρίζουμε πως το **πηνίο /σωληνοειδές** (coil), όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, παράγει διαμήκες μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο είναι εναλλασσόμενο, ημιανορθωμένο ή συνεχές, ανάλογα με το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται.

Εάν τοποθετήσουμε το δοκίμιο μέσα στο πηνίο, παράγεται αντίστοιχη μαγνητική επαγωγή και, επομένως, μπορούν να ανιχνευθούν ασυνέχειες κάθετες προς τη μαγνητική επαγωγή, δηλαδή περιμετρικές ως προς τον άξονα του δοκιμίου.

Τα δοκίμια που ελέγχονται συνήθως με πηνίο είναι επιμήκους μορφής, διότι σε αυτήν την περίπτωση μόνο (λόγος  $L/D$  δοκιμίου μεγάλος) έχουμε ισχυρή μαγνήτιση.

Η λειτουργική μαγνητική διαπερατότητα δίνεται από τον τύπο:

$$m_{eff} = 6 \frac{L}{D} - 5 \quad (5.21)$$

για την περίπτωση που ο λόγος  $L/D$  είναι μικρότερος ή ίσος του 15 και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου μεγαλύτερη του 500.

Εάν το δοκίμιο τοποθετηθεί κεντρικά στο πηνίο, τότε ο απαιτούμενος αριθμός αμπεροστροφών του πηνίου δίνεται από τον τύπο:

$$NI = \frac{43.000 \times R}{m_{eff}} \quad (5.22)$$

οπού  $N$  ο αριθμός των στροφών του πηνίου,  $I$  η ένταση του ρεύματος (peak) και  $R$  η ακτίνα του πηνίου.

Προκειμένου όμως να επιτύχουμε ισχυρότερη μαγνήτιση με μικρότερη τιμή  $NI$ , τοποθετούμε συνήθως το δοκίμιο σε επαφή με τις σπείρες, οπότε ισχύει ο τύπος:

$$NI = \frac{45.000}{L/D} \quad (5.23)$$

Οι δύο ανώτεροι τύποι ισχύουν με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου (επιφάνεια διατομής δοκιμίου προς επιφάνεια διατομής πηνίου) είναι μικρότερος από 1/10. Στην περίπτωση στρογγυλού δοκιμίου με μικρό μήκος, μια συνήθης πρακτική, προκειμένου να βελτιώσουμε (αυξήσουμε) τον λόγο L/D είναι να τοποθετήσουμε σε επαφή με το δοκίμιο έναν άλλο κύλινδρο ίδιας περιόδου διαμέτρου και χωρίς ασυνέχειες.

Στην περίπτωση δοκιμίου μεγάλου μήκους συνήθως θεωρούμε επαρκή την μαγνήτιση του δοκιμίου εφόσον το μήκος του εξέχει από κάθε πλευρά του πηνίου όχι περισσότερο από όση είναι η ακτίνα του πηνίου. Σε αντίθετη περίπτωση, απαιτείται μετακίνηση είτε του πηνίου γύρω από το δοκίμιο είτε του δοκιμίου μέσα στο πηνίο και επανάληψη του ελέγχου.

Οι **συσκευές πάγκου** (bench units) που προαναφέραμε στην άμεση μαγνήτιση με μετωπική επαφή, μπορούν επίσης να δεχθούν πηνίο αλλά συνήθως και ακροδέκτες, όπως επίσης μπορούν να παράγουν **μαγνητική ροή**, μέσω δύο πόλων που έχουν για αυτό το λόγο.

#### 5.9.4 Τεχνική Εύκαμπτου Αγωγού

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν εύκαμπτο (και φυσικά μονωμένο) ηλεκτρικό καλώδιο προκειμένου να το τυλίξουμε γύρω από ένα δοκίμιο, δημιουργώντας έτσι ένα διαμήκες μαγνητικό πεδίο.

Ο αγωγός πρέπει να έχει πολύ μικρή αντίσταση (προκειμένου η ένταση του ρεύματος να παραμένει μεγάλη). Τέτοια καλώδια είναι αυτά που χρησιμοποιούμε στην ηλεκτροκόλληση είτε εκείνα που χρησιμοποιούνται για να φορτιστούν μπαταρίες αυτοκινήτων. Η τεχνική αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην περίπτωση φλαντζών (για τον έλεγχο των οπών των κοχλιοσυνδέσεων) ή παρεμφερών καταστάσεων, όταν θέλουμε να επάγουμε τοπική επιμήκη μαγνήτιση.

#### 5.9.5 Τεχνική Κεντρικού Αγωγού

Γνωρίζουμε ότι εάν περάσει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από έναν αγωγό, παράγεται κυκλικό οπτικό πεδίο γύρω από αυτόν.

Στην τεχνική κεντρικού αγωγού (central conductor) χρησιμοποιούμε ένα κυλινδρικό τεμάχιο από ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό και περνούμε το προς έλεγχο δοκίμιο γύρω από αυτό (και συνήθως σε επαφή). Προφανώς η τεχνική είναι κατάλληλη για δακτυλιοειδή δοκίμια είτε μορφής σωλήνα.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι μέγιστη στην εσωτερική επιφάνεια του δοκιμίου (και βέβαια στα σημεία του που ακουμπούν στον κεντρικό αγωγό) και ελαττώνεται πηγαίνοντας προς την εξωτερική, ανάλογα με το πάχος του. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει απότομα, μόλις βρεθούμε στον αέρα, και κατόπιν ελαττώνεται εκθετικά, όσο απομακρυνόμαστε από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου.

### **5.9.6 Μαγνητικό Πεδίο γύρω από Ηλεκτρικό Αγωγό**

Εάν ένας κυλινδρικός αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, μέσα και γύρω από αυτόν επάγεται κυκλικό μαγνητικό πεδίο.

Στην περίπτωση μη σιδηρομαγνητικού αγωγού και συνεχούς ρεύματος (DC), η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι μηδενική στο κέντρο του αγωγού και αυξάνεται κατ'ευθείαν ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο, όσο πηγαίνουμε προς την εξωτερική επιφάνεια, που έχει την μεγαλύτερη τιμή (F). Κατόπιν ελαττώνεται εκθετικά, λαμβάνοντας τιμή  $F/2$  σε απόσταση  $2R$  από το κέντρο του αγωγού,  $F/3$  σε απόσταση  $3R$  κ.ο.κ.

Εάν ο μη σιδηρομαγνητικός αγωγός είναι κοίλος εσωτερικά, τότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι μηδενική στο εσωτερικό του αγωγού και μέχρι την εσωτερική επιφάνεια και κατόπιν αυξάνεται (περισσότερο απότομα από ό,τι στην περίπτωση πλήρους αγωγού), έως ότου λάβει τη μέγιστη τιμή (F) στην εξωτερική επιφάνεια. Εάν ένας πλήρης και ένας κοίλος αγωγός έχουν την ίδια εξωτερική διάμετρο και διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας έντασης, η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι ίδια στην εξωτερική επιφάνεια των δύο αγωγών.

Κατόπιν η πυκνότητα μαγνητικής ροής ελαττώνεται, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του πλήρους αγωγού.

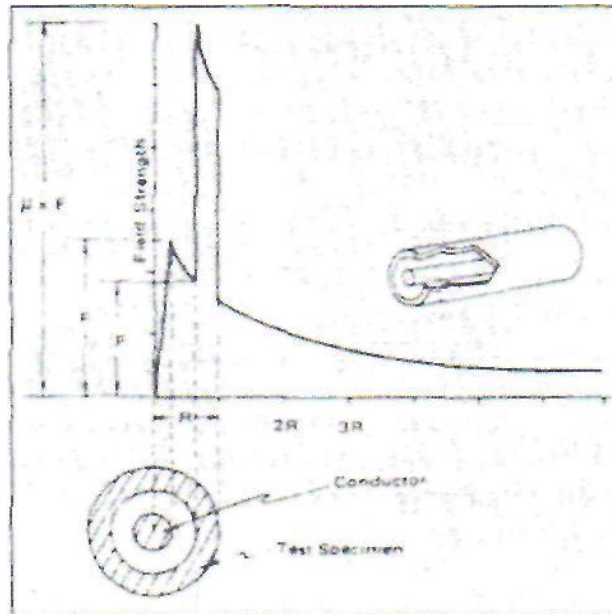
Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν πλήρη αγωγό από σιδηρομαγνητικό υλικό, ο οποίος διαρρέεται από DC, τότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην εξωτερική επιφάνεια έχει τιμή  $\mu \times F$ , όπου  $\mu$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.



Αμέσως όμως μετά τον αγωγό η πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει στην ίδια τιμή ( $F$ ) όπως και στην περίπτωση του μη σιδηρομαγνητικού αγωγού και στη συνέχεια ελαττώνεται και πάλι εκθετικά, πάνω την ίδια καμπύλη όπως και στην περίπτωση του μη σιδηρομαγνητικού αγωγού, αντίστοιχη κατάσταση έχουμε και στην περίπτωση του κοίλου σιδηρομαγνητικού αγωγού που διαρρέεται από DC.

Εάν χρησιμοποιήσουμε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC), τότε η κατάσταση στο εσωτερικό του αγωγού είναι διαφορετική από ό,τι προηγουμένως, λόγω του **επιδερμικού φαινομένου** (skin effect).

Έτσι, στην περίπτωση πλήρους σιδηρομαγνητικού αγωγού, η πυκνότητα μαγνητικής ροής αυξάνεται (από την τιμή μηδέν στο κέντρο του αγωγού) πολύ αργά στην αρχή και απότομα όσο πλησιάζουμε την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, φθάνοντας στην μέγιστη τιμή ( $\mu \times F$ ) ακριβώς πάνω σε αυτή. Κατόπιν πέφτει απότομα (στον αέρα) και συνεχίζει στην ίδια καμπύλη όπως στην περίπτωση του DC. Ανάλογη είναι και η περίπτωση κοίλου σιδηρομαγνητικού αγωγού που διαρρέεται από AC.



**Εικόνα 5.20:** Μαγνητικό Πεδίο μέσα και γύρω από Ηλεκτρικό Αγωγό

- α) Πλήρης μή σιδηρομαγνητικός αγωγός - συνεχές ρεύμα
- β) Κοίλος μή σιδηρομαγνητικός αγωγός - συνεχές ρεύμα
- γ) Πλήρης σιδηρομαγνητικός αγωγός - συνεχές ρεύμα
- δ) Κοίλος σιδηρομαγνητικός αγωγός - συνεχές ρεύμα
- ε) Πλήρης σιδηρομαγνητικός αγωγός - εναλλασσόμενο ρεύμα
- ζ) Κεντρικός αγωγός από μή σιδηρομαγνητικό υλικό, σωλήνας από σιδηρομαγνητικό υλικό, συνεχές ρεύμα

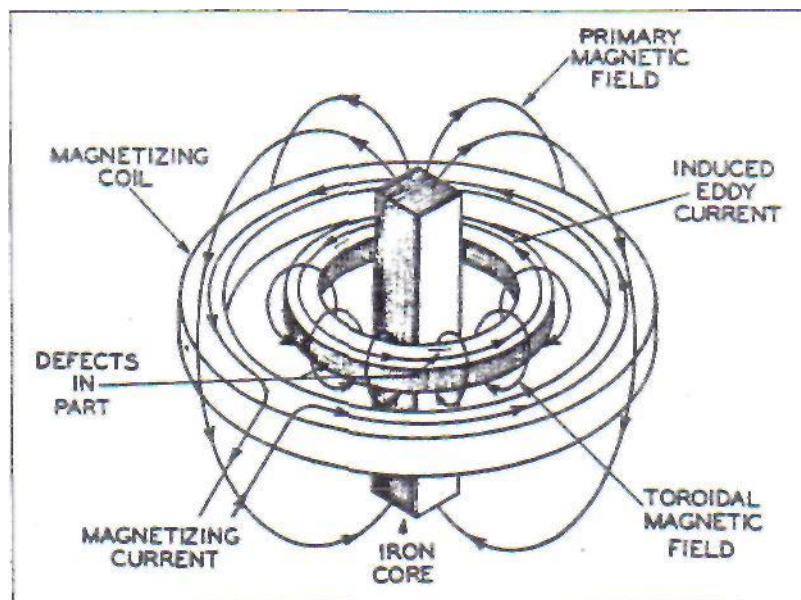
### 5.9.7 Επαγόμενο Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο

Μία μέθοδος εξαιρετικά χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου η μετωπική επαφή μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα «καυμάτων» στο δοκίμιο είναι η μαγνήτιση με **Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή** (induced current magnetization). Εφαρμόζεται κυρίως σε δακτυλιοειδή αντικείμενα.

Ένα πηνίο τοποθετείται παράλληλα προς το δοκίμιο και η τοποθέτηση ενός πυρήνα από μαλακό σίδηρο ενισχύει το αποτέλεσμα.

Για δοκίμια από μαγνητικώς σκληρό υλικό, χρησιμοποιείται συνήθως συνεχές ή πλήρως ανορθωμένο ηλεκτρικό ρεύμα και εφαρμόζεται η παραμένουσα μέθοδος (π.χ. δακτύλιοι ρουλεμάν). Εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα για σύντομο χρονικό διάστημα, το οποίο διακόπτεται πολύ απότομα (quick break). Τότε επάγεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο δοκίμιο, το οποίο είναι αρκετό για την ανίχνευση περιμετρικών ασυνεχειών.

Για περισσότερο μαλακά υλικά, χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο είτε ημιανορθωμένο ρεύμα και συνεχής μέθοδος, καθότι τότε επάγεται συνεχώς ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο δοκίμιο.



Εικόνα 5.21: Επαγόμενο Μαγνητικό Πεδίο

## 5.10 ΟΡΑΤΑ ΚΑΙ ΦΘΟΡΙΖΟΝΤΑ

Όπως αναφέραμε, όλα τα μαγνητιζόμενα σωματίδια έχουν επικάλυψη με ορατή είτε φθορίζουσα βαφή. Σε κάθε περίπτωση, η ικανότητα του ανθρώπινου ματιού να εντοπίσει την ύπαρξη ένδειξης, εξαρτάται και από το λόγο αντίθεσης (contrast ratio) της ένδειξης και του υποβάθρου της. Στην περίπτωση αντίθεσης μαύρου-άσπρου (π.χ. ορατά μαγνητικά σωματίδια) ο λόγος αντίθεσης είναι πρακτικά της τάξης του 9:1, ενώ για αντίθεση κόκκινου-άσπρου (π.χ. συνήθη ορατά διεισδυτικά) της τάξης του 6:1. Πρακτικά, στην περίπτωση φθορίζοντων ουσιών, ο λόγος αντίθεσης εύκολα φτάνει την τιμή 300:1 και τιμές 1000:1 είναι επίσης εφικτές. Θεωρητικά, ο λόγος ορατής αντίθεσης δε μπορεί να ξεπεράσει το 33:1, ενώ επίσης θεωρητικά, στην περίπτωση φθορίζοντος αντικειμένου-μαύρου υποβάθρου, είναι άπειρος.

Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η μέθοδος με φθορίζοντα σωματίδια είναι περισσότερο ευαίσθητη από τη μέθοδο ορατών σωματιδίων, απλά διότι αυξάνεται η ικανότητα αντίληψης της ένδειξης.

Άλλος λόγος είναι ότι, σε άπλετο φως, το ανθρώπινο μάτι διακρίνει μεν πολύ καλά χρωματικές διαφορές αλλά δεν διακρίνει μικρές πηγές φωτός. Τα πράγματα αντιστρέφονται στην περίπτωση σκοταδιού. Μάλιστα, λόγω του φαινομένου που καλείται στα αγγλικά halation, μικρές πηγές φωτός σε σκοτεινό περιβάλλον φαίνονται μεγαλύτερες από ό,τι πραγματικά είναι (και άρα εντοπίζονται ευκολότερα). Επίσης, σε συνθήκες σκότους, το μάτι αυτόματα οδηγείται σε υπάρχουσες πηγές φωτός. Έτσι, και πάλι η φθορίζουσα βαφή είναι πιο «ευαίσθητη», απλά διότι δημιουργεί ένδειξη ευκολότερα αντιληπτή. Εξ άλλου, το ανθρώπινο μάτι είναι ικανό να διακρίνει διαφορά φωτεινότητας της τάξης του 10-15%. Γενικά, σε συνθήκες φωτός το ανθρώπινο μάτι βλέπει μέσω των «κωνίων» (cones), ενώ σε συνθήκες σκοταδιού μέσω των «ραβδίων» (rods), τα οποία είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητα.

### 5.10.1 Παρατήρηση Ενδείξεων Ορατών Σωματιδίων

Χρειάζεται άπλετο και διάχυτο φως, έντασης τουλάχιστον 350 lux (32,5 footcandles). Σημειώνεται ότι ορισμένες προδιαγραφές απαιτούν πολύ μεγαλύτερες εντάσεις, της τάξεως των 1000 lux, ενώ συνήθης τιμή είναι αυτή των 500 lux.

### 5.10.2 Το μαύρο φως

Ορατό φως έχει μήκη κύματος μεταξύ 400 και 700 nm (4000 έως 7000 Angstrom). Σε μικρότερα μήκη κύματος (100 έως 400 nm) βρίσκεται το υπεριώδες φως (ultraviolet). Το υπεριώδες χωρίζεται σε τρεις ζώνες : UV-A (315 - 400 nm), UV-B (280-315nm) και UV-C (100-280 nm). Το τμήμα UV-A ονομάζεται και «μαύρο φως» (black light).

Ενώ τα τμήματα UV-B και UV-C θεωρούνται βλαπτικά για τους ζωντανούς ιστούς και οργανισμούς, το μαύρο φως θεωρείται ακίνδυνο, ακόμα και με άμεση όραση.

### 5.10.3 Φθορίζοντα Σωματίδια

Φθορισμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό απορροφά ενέργεια (συνήθως φως) κάποιου μήκους κύματος και ταυτόχρονα εκπέμπει φως διαφορετικού μήκους κύματος (κατά το φωσφορισμό η εκπομπή συνεχίζει και μετά την απορρόφηση).

Οι φθορίζουσες βαφές των μαγνητιζόμενων σωματιδίων απορροφούν μαύρο φως μήκους κύματος 350-400 nm, με μέγιστη απόδοση στα 365 nm, όπου και η μέγιστη απόδοση του φίλτρου της λάμπας. Εκπέμπουν φως μήκους κύματος 475 - 575 nm, δηλαδή κίτρινο-πράσινο. Το χρώμα αυτό έχει το πλεονέκτημα αφενός να μη συγχέεται με το φυσικό χρώμα φθορισμού οργανικών ουσιών (περίπου μπλε) και αφετέρου είναι εξαιρετικά εύκολα ορατό για το ανθρώπινο μάτι, ακόμη και σε πολύ μικρή ένταση.

### 5.10.4 Παρατήρηση Ενδείξεων Φθορίζοντων Σωματιδίων

Γενικά συνιστάται πολύ χαμηλός φωτισμός περιβάλλοντος (10 - 32 lux, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη προδιαγραφή). Το απόλυτο σκοτάδι, αν και επιθυμητό από άποψη ελέγχου, πρέπει να αποφεύγεται για λόγους ασφαλείας.

Η ένταση του μαύρου φωτός πάνω στο δοκίμιο πρέπει να ελέγχεται. Οι προδιαγραφές απαιτούν ένταση τουλάχιστον 800  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  (συνήθως 1000), συχνά 1500 και ενίοτε 3000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

Συνιστάται παραμονή στο σκοτεινό θάλαμο τουλάχιστον 5 λεπτών, πριν αρχίσει ο έλεγχος, ώστε να υπάρξει προσαρμογή των ματιών στις συνθήκες σκότους.

Συνιστάται επίσης η χρήση γυαλιών που απορροφούν το μαύρο φως (π.χ. sodium type), για να μη κουράζονται τα μάτια και να βελτιώνονται οι συνθήκες όρασης.

Πρέπει επίσης να αποφεύγουμε τα άσπρα ρούχα (ιδίως πουκάμισα), διότι συνήθως τα απορρυπαντικά περιέχουν και φθορίζουσες βαφές στην περιοχή του μπλε (για επίπλαστη αίσθηση καθαρότητας, λόγω φθορισμού από το υπεριώδες φως του ήλιου και των λαμπτήρων).

Εάν κοιτάζουμε απευθείας τη λάμπα μαύρου φωτός, ενδέχεται να «βλέπουμε» φωτεινά σημάδια αλλά και να φαίνονται τα μάτια μας «φωτεινά» από τους παρευρισκόμενους (λόγω φθορισμού ουσιών μέσα στο μάτι). Το φαινόμενο είναι αβλαβές και προσωρινό, μπορεί όμως να φέρει αμηχανία και παροδικά ομιχλώδη όραση στον παθόντα.

Κατά την παρατήρηση, πρέπει να έχουμε πάντα υπόψη μας ότι ένδειξη αποτελεί όχι ό,τι απλώς φαίνεται, αλλά ό,τι μας δίνει την αίσθηση πως ακτινοβολεί.

#### **5.10.5 Λάμπες Μαύρου Φωτός**

Λάμπες μαύρου φωτός υπάρχουν είτε πυρακτώσεως (incandescent) είτε σωληνοειδείς (όπως οι λάμπες φθορισμού) είτε Ατμών Υδραργύρου. Οι δύο πρώτες κατηγορίες δίνουν μικρές εντάσεις και μόνο βοηθητικά ή πολλές μαζί μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ας σημειωθεί ότι οι συνήθεις τύπου πυρακτώσεως πρέπει να τοποθετούνται οριζόντια και όχι κάθετα (όπως οι κοινές λάμπες πυρακτώσεως), διότι εκπέμπουν από το πλάι τους. Και αυτές επίσης έχουν ιδιαίτερο τρόπο έναυσης, οπότε σβήσιμο της λάμπας (επίτηδες είτε λόγω αύξησης της θερμοκρασίας) σημαίνει αναμονή λίγων λεπτών, προκειμένου να αποκατασταθεί το φως.

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες λάμπες μαύρου φωτός είναι αυτές των Ατμών Υδραργύρου. Παράγουν υπεριώδες αλλά και ορατό φως, της τάξης των 300-670 nm, με μέγιστη ένταση στα 365 nm. Το φίλτρο όμως που φέρουν απορροφά τα μικρά μήκη κύματος καθώς και το περισσότερο ορατό και αφήνει μόνο μήκη κύματος 300 - 400 nm (δηλαδή μαύρο φως αλλά και ελάχιστο ορατό ιώδες).

Για λόγους ασφαλείας, το φίλτρο πρέπει να ελέγχεται τακτικά για πιθανά γδαρσίματα, και βεβαίως να μη χρησιμοποιείται αν ραγίσει ή σπάσει. Για λόγους απόδοσης, το φίλτρο πρέπει να καθαρίζεται τακτικά από σκόνες είτε άλλους ρύπους.

Η ακτινοβολία μέγιστης έντασης που περνά από το φίλτρο παρουσιάζεται στα 365 nm, δηλαδή εκεί που είναι και η μέγιστη ένταση παραγωγής φωτός αλλά και το σημείο ενεργοποίησης των φθοριζόντων βαφών.

Το τόξο υδραργύρου δημιουργείται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε κρυστάλλινη κάψα γεμάτη με αέριο Νέον, όπου υπάρχει και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο για την έναυση του τόξου, μέσω θέρμανσης και εξάτμισης του υδραργύρου. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με ρεύμα μέσω ηλεκτρικής αντίστασης.

Το όλο σύστημα τροφοδοτείται από μετασχηματιστή, ώστε να περιορίζεται η τιμή της έντασης του ρεύματος στα βασικά ηλεκτρόδια.

Η κάψα με τα προαναφερθέντα τρία ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένη σε γυάλινο περίβλημα. Το εμπρόσθιο μέρος του περιβλήματος έχει κατάλληλη κυρτότητα, ώστε να εστιάζεται το φως της λάμπας.

Η επιλογή του εκπεμπόμενου φάσματος γίνεται κύρια μέσω κατασκευαστικής ρύθμισης της πίεσης στην εσωτερική κρυστάλλινη κάψα. Υψηλή πίεση (100 atm) δίνει συνεχές φάσμα, ενώ μέση πίεση (1-10 atm) δίνει το σωστό φάσμα φωτός, δηλ. υπεριώδες και κυρίως μαύρο φως. Γι' αυτό το λόγο οι πλέον χρησιμοποιούμενες λάμπες είναι μέσης πίεσης (συνήθως 10 atm). Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες λάμπες Ατμών Υδραργύρου είναι τύπου Spot, 100 Watt.

Εάν υπερθερμανθεί, η λάμπα σβήνει (γι' αυτό και συνιστάται αφαίρεση του φίλτρου και καθαρισμός τόσο του φίλτρου όσο και της λάμπας). Κάθε σβήσιμο της λάμπας (επίτηδες είτε λόγω υπερθέρμανσης) έχει μεγάλες συνέπειες στη διάρκεια ζωής της, καθώς για κάθε άναμμα καταναλώνεται υλικό των ηλεκτροδίων. Επίσης, υψηλή τάση δικτύου μπορεί να φέρει μεγάλη ελάττωση της ζωής της λάμπας. Χαμηλή τάση θα έχει συνέπεια το σβήσιμο της.

Μία λάμπα, από τη στιγμή που ανάψει, χρειάζεται πέντε τουλάχιστον λεπτά για να φθάσει στην πλήρη απόδοση της. Εάν σβύσει, τότε χρειάζεται τουλάχιστον 10 λεπτά, για να έχει πάλι πλήρη απόδοση. Αυτός είναι και ένας άλλος λόγος για τον οποίο δε σβύνουμε τη λάμπα, παρά μόνο στο τέλος της εργασίας.

Πρόσφατα κυκλοφόρησαν στο εμπόριο λάμπες μαύρου φωτός οι οποίες φθάνουν στη μέγιστη απόδοση τους πάρα πολύ γρήγορα μετά το άναμμα, ακόμη και αν τις σβύσαμε μόλις προηγουμένως.

## 5.11 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

Παρότι δεν απαιτείται πάντοτε, η απομαγνήτιση είναι ένα απαραίτητο βήμα του ελέγχου μαγνητικά σωματίδια, ιδιαίτερα όπου η παραμένουσα μαγνήτιση μπορεί να δημιουργήσει (κατά τη χρήση του δοκιμίου) προβλήματα σε γειτονικά ευαίσθητα ηλεκτρομαγνητικά όργανα, να προκαλέσει **μαγνητικό φύσημα** κατά την ηλεκτροσυγκόλληση, να ελκύσει ρινίσματα που είτε θα βλάψουν το δοκίμιο (π.χ. στην περίπτωση ρουλεμάν ή οδοντωτών τροχών) είτε θα προκαλέσουν ενοχλήματα (π.χ. στην περίπτωση εργαλείων ή δοκιμίων που θα υποστούν μηχανική κατεργασία). Η παραμένουσα μαγνήτιση είναι επίσης ανεπιθύμητη στην περίπτωση που το δοκίμιο θα επανελεγχθεί με μαγνητική επαγωγή λιγότερο ισχυρή από την παραμένουσα (και γι' αυτό συνιστάται η απομαγνήτιση επίσης σαν πρώτο στάδιο ελέγχου).

Απομαγνήτιση συνήθως δεν απαιτείται στην περίπτωση δοκιμίων από πολύ μαλακό (μαγνητικώς) χάλυβα, έτοιμων συγκολλήσεων, θερμικής κατεργασίας (μετά τον έλεγχο) από τη θερμοκρασία Curie και μαγνήτισης (στη συνέχεια) με ισχυρότερο πεδίο άλλης διεύθυνσης (π.χ. μεταξύ βημάτων κυκλικής και διαμήκους μαγνήτισης). Η παραμένουσα μαγνήτιση συνήθως θεωρείται αμελητέα όταν έχει τιμή μικρότερη των 3 Gauss (στην επιφάνεια του δοκιμίου).

Πλήρης απομαγνήτιση επιτυγχάνεται μόνο με θέρμανση πάνω από το σημείο Curie (650° έως 870°C για τα περισσότερα μέταλλα, 770°C για το σίδηρο). Απομαγνήτιση επίσης επιτυγχάνεται με σφυρηλάτηση του δοκιμίου. Πρακτικά όμως εκτελούμε απομαγνήτιση εφαρμόζοντας στο δοκίμιο διαδοχικά μαγνητίζουσα δύναμη ολοένα και μικρότερη και αντίστροφης φοράς από ό,τι η προηγούμενη. Χρειάζεται προσοχή στο ότι η πρώτη μαγνήτιση (απομαγνήτισης) θα πρέπει να παράγει μαγνητική ροή μεγαλύτερη από την παραμένουσα.

Απομαγνήτιση μπορεί να γίνει και με συνεχές ρεύμα, αλλά είναι περισσότερο πρακτικό να χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο, διότι η φορά του αλλάζει αυτόματα και δεν απαιτούνται ειδικές ηλεκτρικές διατάξεις.

Το κυκλικό μαγνητικό πεδίο είναι δυσκολότερο να ανιχνευθεί από το διαμήκες (δεν παρουσιάζει πόλους), απομακρύνεται όμως εύκολα με την εφαρμογή ενός επιμήκους πεδίου, ισχυρότερου από το υπάρχον κυκλικό. Γι' αυτό συνιστάται να προηγείται ο έλεγχος με κυκλικό πεδίο και να έπεται αυτός με διαμήκες, ώστε το μεν

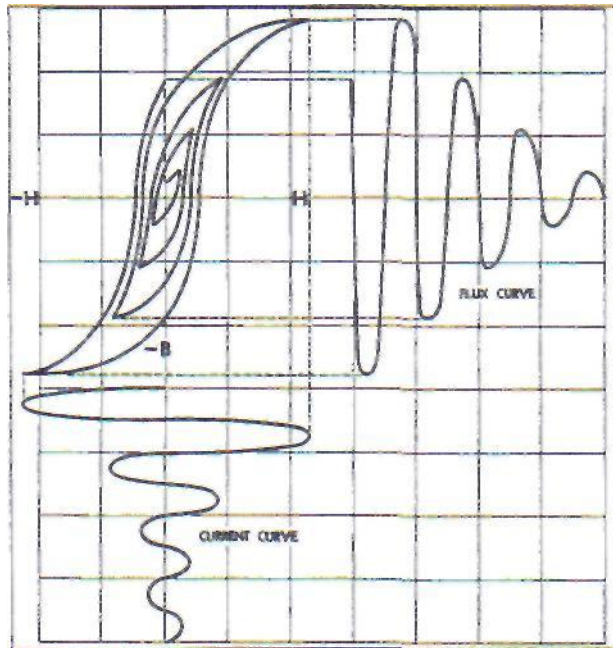


(εξωτερικά αφανές) κυκλικό πεδίο να έχει απομακρυνθεί, ενώ η απομαγνήτιση του τελικού (διαμήκους) πεδίου να είναι εύκολο να ελεγχθεί.

Οι διατάξεις απομαγνήτισης αποτελούνται συνήθως από ένα πηνίο, όπου μπορούμε είτε να απομακρύνουμε το δοκίμιο είτε να ελαττώσουμε σταδιακά την ένταση της μαγνητίζουσας δύναμης. Απομαγνήτιση μπορούμε να επιτύχουμε και με YOKE AC, περνώντας το δοκίμιο μέσα από το διάστημα των πόλων είτε απομακρύνοντας σιγά - σιγά το YOKE από την επιφάνεια του δοκιμίου. Η συχνότητα εναλλαγής της πολικότητας πρέπει να είναι μικρή και ρεύμα AC 50 Hz στην Ευρώπη και 60 Hz στις ΗΠΑ είναι οριακή, ιδιαίτερα μάλιστα για απομαγνήτιση σε όλο το βάθος του υλικού.

Απομαγνήτιση μπορεί επίσης να εκτελεστεί με χρήση εύκαμπτων αγωγών και τύλιγμα γύρω από το δοκίμιο. Εάν χρησιμοποιούμε πηνίο και τράβηγμα του δοκιμίου μέσα και μακριά από αυτό, είναι πολύ χρήσιμο να περιστρέφουμε το δοκίμιο, τόσο κυκλικά όσο και εγκάρσια, ως προς τον άξονα του πηνίου.

Μετά την απομαγνήτιση των δοκιμίων και εφόσον αυτά είναι εξαιρετικά επιμήκη (π.χ. άξονες, σωλήνες) και σχετικώς σκληρά, είναι πολύ σημαντικό να αποθηκεύονται με διεύθυνση ανατολής-δύσης, διότι η διεύθυνση βορρά-νότου μπορεί και πάλι να προξενήσει μαγνήτιση λόγω του γήινου μαγνητικού πεδίου. Μαγνήτιση μπορεί επίσης να επιτευχθεί ακόμα και αν αποθηκευτούν υλικά τέτοιας φύσης κοντά σε τεχνητά πεδία, όπως π.χ. αυτά που δημιουργούνται από ισχυρές ηλεκτρικές μηχανές ή π.χ. ηλεκτροφόρα καλώδια μεγάλης έντασης ρεύματος. Εξ' άλλου, αποτελεσματικότερη απομαγνήτιση επιτυγχάνεται με τα (επιμήκη) δοκίμια προσανατολισμένα στην διεύθυνση ανατολής-δύσης, πάλι για να αποφευχθεί η επίδραση του πεδίου της γης.



**Εικόνα 5.22:** Καμπύλη απομαγνήτισης

## 5.12 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

### 5.12.1 Το Φαινόμενο Hall

Έστω ότι ηλεκτρικό ρεύμα περνά κατά μήκος ενός ορθογώνιου μεταλλικού ελάσματος. Τότε συμμετρικά σημεία στο πλάτος του ελάσματος, έχουν μηδενική διαφορά ηλεκτρικής τάσης. Εάν όμως τοποθετήσουμε ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος, τα προαναφερθέντα συμμετρικά σημεία θα έχουν διαφορά τάσεως και αν συνδεθούν με ένα γαλβανόμετρο, θα υπάρχει ροή ρεύματος από το ένα σημείο στο άλλο, δηλαδή εγκάρσια προς το αρχικό ηλεκτρικό ρεύμα. Το ανωτέρω καλείται **φαινόμενο Hall** (Hall effect).

Η ένταση του εγκάρσιου ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτάται και από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η εγκάρσια διαφορά τάσης είναι κατ' ευθείαν ανάλογη προς το διαμήκες ηλεκτρικό ρεύμα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου και αντιστρόφως ανάλογη προς το πάχος του ελάσματος.

Βασιζόμενοι στο φαινόμενο Hall μπορούμε να κατασκευάσουμε ειδικές κεφαλές ανίχνευσης (Hall probes), οι οποίες μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Οι κεφαλές Hall χρησιμοποιούνται επίσης και στην ανίχνευση ρηγματώσεων είτε

διάβρωσης (ακόμα και τρημματικής) σε χαλύβδινα ελάσματα, στη **Μέθοδο Διαρροής Μαγνητικού Πεδίου** (flux leakage method).

### 5.12.2 Όργανα Μετρήσεων Μαγνητικού Πεδίου

Εν γένει είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί η μαγνητική επαγωγή (B) μέσα σε ένα υλικό, χωρίς να διαταραχθεί η τιμή της. Το όργανο το οποίο μπορεί να κάνει τέτοια μέτρηση είναι ο **Μετρητής Μαγνητικής Ροής** (flux meter) που όμως έχει εφαρμογή μόνο σε δοκίμια κατάλληλου σχήματος. Αποτελείται από ένα πηνίο στο οποίο τοποθετείται το μαγνητισμένο δοκίμιο. Μέσω ενός γαλβανομέτρου μετράται η μέση τιμή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πηνίου και κατά τη διεύθυνση του άξονα του πηνίου. Επομένως να υπολογιστεί η μέση τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής μέσα στο δοκίμιο. Εναλλακτικά, το πηνίο μπορεί να διαμορφωθεί με κατάλληλο τύλιγμα ενός εύκαμπτου αγωγού γύρω από το δοκίμιο (π.χ. γύρω από ένα δακτύλιο ρουλεμάν).

Άλλη κατηγορία οργάνων είναι οι **Μετρητές Μαγνητικού Πεδίου** (magnetic field meters), που μετρούν την ένταση του πεδίου στον αέρα. Ουσιαστικά, μετρούν την εφαπτομενική συνιστάμενη της έντασης (H) του πεδίου κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου, δηλ. τη συνισταμένη που είναι παράλληλη προς την επιφάνεια του. Παρότι συχνά αυτά τα όργανα είναι βαθμομημένα σε Gauss, ουσιαστικά μετρούν Oersted (θυμίζουμε ότι στο ΗΜΣ οι αριθμητικές τιμές τους συμπίπτουν).

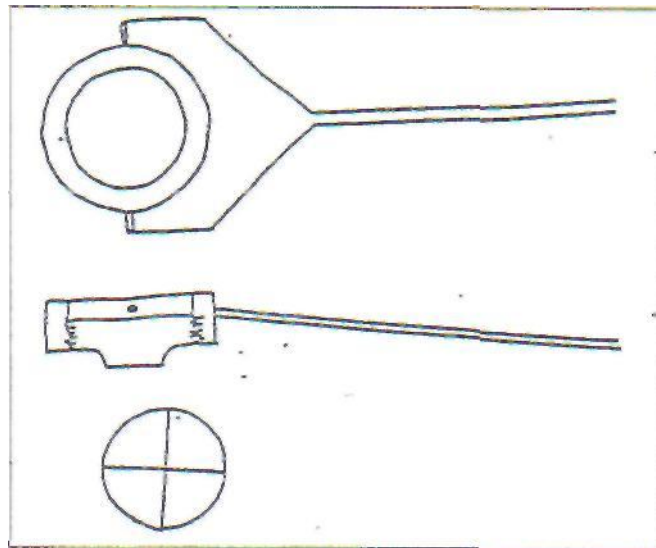
Επειδή η τιμή της εφαπτομενικής συνισταμένης της H είναι ίδια σε κάθε πλευρά της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου, εάν γνωρίζουμε τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (πράγμα επίσης δύσκολο, μια και εξαρτάται και αυτή από την ένταση του πεδίου), μπορούμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική επαγωγή μέσα στο υλικό και κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του.

Η κύρια εφαρμογή όμως των μετρητών μαγνητικού πεδίου είναι η εύρεση της διεύθυνσης του πεδίου και η συγκριτική παρατήρηση της έντασης του. Έτσι, εάν γνωρίζουμε την μέτρηση που απαιτείται για να έχουμε επαρκή μαγνήτιση, μπορούμε στη συνέχεια να βασιζόμαστε στην επίτευξη αυτής της τιμής της εφαπτομενικής συνιστώσας της H, χωρίς να ενδιαφερόμαστε για την πραγματική τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Οι μετρητές μαγνητικού πεδίου βασίζονται συχνά στο **φαινόμενο Hall** (Hall effect), παρότι υπάρχουν και άλλες αρχές πάνω στις οποίες μπορούν να αναπτυχθούν.

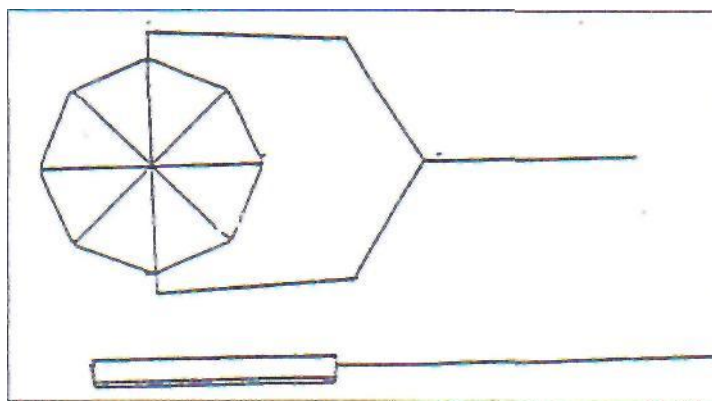
Μία εντελώς διαφορετική κατηγορία οργάνων είναι οι **Δείκτες Μαγνητικού**

**Πεδίου** (magnetic field indicators). Οι δείκτες χρησιμοποιούνται για την εύρεση της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και σαν μη ακριβής τρόπος σύγκρισης της έντασης του στον αέρα, κοντά στην επιφάνεια του υλικού (πάλι πρόκειται για την εφαπτομενική συνιστώσα του πεδίου). Δεν παρέχουν καμία ποσοτική πληροφορία και χρειάζεται προσοχή διότι παρέχουν ένδειξη ακόμα και πάνω σε μη σιδηρομαγνητικό υλικό. Άρα η παρουσία ισχυρής ένδειξης σε ένα δείκτη δεν σημαίνει ότι υπάρχει αρκετή μαγνητική επαγωγή, εάν προηγουμένως δεν έχουμε ελέγξει ότι το υλικό είναι σιδηρομαγνητικό. Οι συνηθέστεροι δείκτες μαγνητικού πεδίου είναι τύπου ASME, τύπου Berthold (όπου η απόσταση των γραμμών ένδειξης από την επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να αλλάξει), τύπου κέρματος κλπ.

Οι δείκτες μαγνητικού πεδίου πρέπει να χρησιμοποιούνται απαραίτητως κατά τον έλεγχο με Μαγνητικά Σωματίδια, προκειμένου να επιβεβαιώνεται η ύπαρξη πεδίου (και η διεύθυνση του) και να ρυθμίζεται συγκριτικά (και εμπειρικά) η ένταση του.



**Εικόνα 5.23:** Δείκτες Μαγνητικού Πεδίου



**Εικόνα 5.24:** Δείκτης Berthold

## 5.13 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΕΝΔΕΙΞΕΩΝ

### 5.13.1 Ερμηνεία Ενδείξεων

Οι **ενδείξεις** (indications) της μεθόδου Μαγνητικών Σωματιδίων δεν είναι παρά συγκεντρώσεις μαγνητιζόμενων σωματιδίων στην επιφάνεια του ελεγχόμενου δοκιμίου. Απαιτείται λοιπόν **ερμηνεία** (interpretation) αυτών των ενδείξεων, προκειμένου να βρεθεί η προέλευση τους, για να είναι δυνατόν να αξιολογηθεί η σημασία τους. Οι ενδείξεις διακρίνονται σε **αληθείς** (true) και **ψευδείς** (false indications). Οι αληθείς ενδείξεις προέρχονται από διαρρέον μαγνητικό πεδίο (λόγω διαφοράς μαγνητικής διαπερατότητας σε διαφορετικά σημεία του υλικού) ενώ οι ψευδείς είναι αποτέλεσμα αιτίων που δεν έχουν σχέση με τη μαγνήτιση. Ψευδείς, για παράδειγμα, είναι οι ενδείξεις (συγκεντρώσεις σωματιδίων) λόγω βαρύτητας σε κοιλότητες ή επικλινή σημεία του δοκιμίου είτε λόγω συγκράτησης τους από επιφανειακό λάδι, γράσο, χαλαρά οξειδία κλπ. Η ύπαρξη ψευδών ενδείξεων σχεδόν πάντοτε σημαίνει κακό προκαθορισμό του δοκιμίου.

Οι αληθείς ενδείξεις διακρίνονται σε **σχετικές** (relevant) και μη **σχετικές** (non-relevant). Οι μη σχετικές ενδείξεις προέρχονται από αναμενόμενη διαρροή του μαγνητικού πεδίου, π.χ. σε ακμές, σπειρώματα, σφηνοδρόμους κλπ. Επίσης από προϋπάρχουσα διαφορά μαγνητικής διαπερατότητας (π.χ. κατά τη συγκόλληση δύο δοκιμίων με αρκετά διαφορετικές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας).

Περίπτωση μη σχετικής ένδειξης είναι και η **μαγνητική γραφή** (magnetic writing). Εάν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό (ιδιαίτερα μάλιστα εάν είναι μαγνητικώς σκληρό) τριφτεί ή έστω πλησιάσει αρκετά ένα μαγνήτη, τότε, μαγνητιζόμενο τοπικά το ίδιο, παρουσιάζει αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας στην περιοχή μόνιμης μαγνήτισης. Εάν, κατόπιν, το υλικό αυτό ελεγχθεί με Μαγνητικά Σωματίδια, τότε

παρουσιάζεται διαρροή του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή αυτή και επομένως και εμφάνιση ένδειξης.

Άλλες κατηγορίες μη σχετικών ενδείξεων είναι ή ένδειξη στα άκρα υπάρχουσας επιφανειακής οξειδωσης αρκετού πάχους και ισχυρά συνδεδεμένης με το δοκίμιο καθώς και η ένδειξη στα σημεία **υποκοπής** (undercut) συγκολλήσεων (όπου απαιτείται αρκετή προσοχή και εμπειρία, για να μην ερμηνευτεί σαν ένδειξη ρήγματος είτε ατελούς τήξης-ψυχρής επικάλυψης).

Μη σχετική ένδειξη είναι επίσης και ή **συσσωμάτωση** (furring), που προέρχεται από πολύ μεγάλες τιμές μαγνητιζουσας δύναμης. Γι' αυτό το λόγο, ή μαγνητιζουσα δύναμη (είτε ή ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που επιφέρει τη μαγνήτιση) πρέπει να είναι τόσο μεγάλη, όσο μόνον απαιτείται για το σχηματισμό ένδειξης. Κάθε μεγαλύτερη τιμή μπορεί να προκαλέσει μη σχετικές ενδείξεις, δυσκολεύοντας την παρατήρηση και την ερμηνεία των λοιπών ενδείξεων.

Οι μη σχετικές ενδείξεις, συγκριτικά με τις σχετικές, εν γένει είναι περισσότερο φαρδιές, άτονες και χαλαρές ενώ οι σχετικές είναι περισσότερο λεπτές, οξείες (έντονες, πυκνές) και σφικτές πάνω στο δοκίμιο (απομακρύνονται δυσκολότερα). Δυστυχώς όμως και οι σχετικές ενδείξεις που προέρχονται από εντελώς υποεπιφανειακές ασυνέχειες είναι επίσης φαρδιές, άτονες και χαλαρές, συγκριτικά με τις προερχόμενες από επιφανειακές ασυνέχειες.

Άλλη κατηγορία μη σχετικής ένδειξης είναι αυτή στην περίπτωση ψυχρής έλασης ή εν γένει ψυχρής διαμόρφωσης του υλικού (πλαστική παραμόρφωση σε θερμοκρασία κατώτερη από αυτή της ανακρυστάλλωσης). Εάν υπάρξει τοπική ψυχρή διαμόρφωση, η μαγνητική διαπερατότητα αλλάζει επίσης τοπικά και μπορεί να οδηγήσει σε μη σχετικές ενδείξεις, κατά τον έλεγχο. Αυτές οι ενδείξεις εξακολουθούν να υπάρχουν, ακόμη και στην περίπτωση απομαγνήτισης και επανελέγχου, ενώ με την ίδια διαδικασία, οι ενδείξεις μαγνητικής γραφής εξαφανίζονται. Ενδείξεις τέτοιας κατηγορίας έχουν παρουσιαστεί στην κατασκευή ελατηρίων αλλά και προϊόντων που έχουν τύχει μηχανουργικής κατεργασίας με κακώς τροχισμένα εργαλεία.

Στην προηγούμενη κατηγορία θα πρέπει να ενταχθούν και οι ενδείξεις των επιπέδων ολίσθησης (γραμμές Luder), σε ελάσματα που έτυχαν ψυχρής έλασης ή κάμψης (π.χ. ελάσματα δοχείων) και δεν έλαβε χώρα **αποτακτική ανόπτηση** (stress-relieving).

Μη σχετική ένδειξη παράγεται επίσης στην περίπτωση μπρουντζοκόλλησης δύο υλικών (ακόμη και εάν αμφότερα είναι σιδηρομαγνητικά, μια και η ίδια η κόλληση είναι

μη σιδηρομαγνητική).

Ενίοτε, στην περίπτωση συγκολλήσεων, μπορεί να παρατηρηθεί μη σχετική ένδειξη στην περιοχή μεταξύ του λουτρού της κόλλησης και του μετάλλου βάσεως, λόγω απότομης αλλαγής της μαγνητικής διαπερατότητας των δύο υλικών, χωρίς τούτο να οδηγεί οπωσδήποτε σε περαιτέρω διερεύνηση των αιτίων.

Προκειμένου για αληθείς σχετικές ενδείξεις, αυτές οφείλονται σε υπάρχουσες ασυνέχειες μέσα στο υλικό. Γενικά ταξινομούνται σε **γραμμικές** (διάσταση μήκους μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της διάστασης πλάτους) είτε **στρογγυλόμορφες**. Ενίοτε η ερμηνεία των ενδείξεων μπορεί να προχωρήσει σε ένα περαιτέρω βήμα, δηλαδή, στην εύρεση της φύσης της ασυνέχειας που προκαλεί την ένδειξη (ραφή, επίμηκες έγκλεισμα, ρήγμα κάποιου επιμέρους είδους κλπ.).

Οι αληθείς σχετικές ενδείξεις χρειάζονται **αξιολόγηση** (evaluation), προκειμένου να αποφανθούμε εάν βλάπτουν την μελλοντική χρήση του δοκιμίου και άρα πρέπει να αφαιρεθούν είτε εάν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί το δοκίμιο ως έχει. Παρότι πλήρης αξιολόγηση μπορεί να γίνει μόνο με κριτήρια καταλληλότητας για τη συγκεκριμένη χρήση (fitness for purpose) του δοκιμίου και επειδή τούτο είναι εξαιρετικά δύσκολο, χρονοβόρο και δαπανηρό, συνήθως χρησιμοποιούνται κατάλληλες προδιαγραφές αποδοχής-απόρριψης (accept-reject procedures), ανάλογα με το είδος του δοκιμίου, τη χρήση του και βέβαια την επιλογή του πελάτη-χρήστη (και πάντως ποτέ αυθαίρετα από τον ελεγκτή).

Ας σημειωθεί με έμφαση ότι ο χειριστής Μαγνητικών Σωματιδίων μπορεί μόνο να εφαρμόσει την προδιαγραφή αποδοχής-απόρριψης, εφόσον του δοθεί από τον πελάτη-χρήστη, και πρόκειται για εξαιρετικά κακή τακτική να προβαίνει αυθαίρετα σε διατυπώσεις σχετικές με την κρισιμότητα ή όχι της ασυνέχειας (θυμηθείτε σχετικά: όταν οι προδιαγραφές μιλούν, οι έξυπνοι σιωπούν).

Η εύρεση της φύσης μίας ασυνέχειας προϋποθέτει καλή γνώση της μεθόδου κατασκευής του δοκιμίου και των ασυνεχειών που αυτή η μέθοδος μπορεί να παράγει. Προϋποθέτει επίσης (προκειμένου για δοκίμια που δεν είναι αχρησιμοποίητα) γνώση των συνθηκών φόρτισης και των εξωτερικών συνθηκών λειτουργίας (π.χ. διαβρωτικό ή όχι περιβάλλον), καθώς και σχετικές γνώσεις μηχανολογίας και ενδεχόμενα μεταλλουργίας. Η πραγματική αιτία της ασυνέχειας μπορεί να βρεθεί με βεβαιότητα μόνο με κρυσταλλογραφικό έλεγχο του υλικού.

### 5.13.2 Ασυνέχειες και Ελαττώματα

Μία **ασυνέχεια** (discontinuity, flaw) μπορεί να θεωρηθεί **ελάττωμα** (defect), μόνο εάν μπορεί να βλάψει την μελλοντική χρησιμότητα του δοκιμίου. Όπως αναφέραμε, η απόφαση λαμβάνεται είτε με μελέτη καταλληλότητας για τη συγκεκριμένη χρήση (fitness for purpose) είτε μέσω προδιαγραφών αποδοχής-απόρριψης.

Γενικά όμως μπορούν να διατυπωθούν κάποιοι σχετικοί όροι για την επικινδυνότητα μιας ασυνέχειας (αρκεί να θυμόμαστε ότι είναι σχετικοί και όχι απόλυτοι και ότι με κανένα τρόπο δεν μπορούν να υποκαταστήσουν την προδιαγραφή αποδοχής-απόρριψης είτε τη μελέτη καταλληλότητας).

α) Μία ασυνέχεια ανοικτή στην επιφάνεια είναι περισσότερο επικίνδυνη από μία πλήρως υποεπιφανειακή. Τούτο είτε διότι οι μέγιστες καμπτικές τάσεις παρουσιάζονται στην επιφάνεια (όπου επίσης και οι ρωγμές κόπωσης) είτε διότι στην επιφάνεια ενδεχόμενα θα παρουσιαστούν συνθήκες διάβρωσης.

β) Μία ασυνέχεια είναι περισσότερο επικίνδυνη όσο μεγαλύτερη γωνία (έως 90°) σχηματίζει με τη διεύθυνση φόρτισης, διότι ελαττώνει περισσότερο τη χρήσιμη διατομή του υλικού.

γ) Μία ασυνέχεια με αιχμηρά άκρα (π.χ. σημάδια από κοπτικό εργαλείο τόννευσης) είναι περισσότερο επικίνδυνη από μία ασυνέχεια με στρογγυλεμένα άκρα. Τούτο διότι μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση κόπωσης είτε να λειτουργήσει σαν σημείο συγκέντρωσης τάσεων (stress raiser).

δ) Οι επιμήκεις-γραμμικές ασυνέχειες θεωρούνται περισσότερο επικίνδυνες από τις στρογγυλόμορφες-σφαιρικές.

### 5.13.3 Εικόνα των Ασυνχειών

Συχνά αρκεί να προσδιοριστεί εάν μία ασυνέχεια είναι γραμμική (η μία διάσταση μεγαλύτερη του τριπλασίου της άλλης) ή στρογγυλόμορφη. Όμως είναι χρήσιμο να αναφέρουμε τις βασικές ασυνέχειες υλικών και τις συνήθεις εικόνες των ενδείξεων που προκαλούν.

- Ρήγματα από θερμότητα καθώς και ρήγματα τροχίσματος: Γραμμικές ενδείξεις, συχνά διακλαδούμενες (δικτυωτές).
- Δυναμοδιάβρωση (SCC) : Μικρές, λεπτές, πολύ ευκρινείς και συχνά «οδοντωτές» (jagged) γραμμές. Συχνά αρκετές μαζί, επίσης συχνά ξεκινούν από



σημείο τρηματικής διάβρωσης (pitting).

- Κρυόπηγμα χυτού (cold shut) : Ευθείες ή πολύ ελαφρά καμπύλες «λείες» γραμμές, συνεχείς ή διακεκομμένες.
- Αναδίπλωση σφυρήλατου (forging lap): Λεπτές συνεχείς (σπανιότερα διακεκομμένες) γραμμές.
- Ρήγματα γενικά: Συνεχείς (ή σπανιότερα διακεκομμένες) γραμμές, συχνότατα «οδοντωτές» (jagged).
- Ραφή σε προϊόν εξέλασης/διέλασης (seam) είτε επίμηκες έγκλεισμα (stringer): Συνεχής διακεκομμένη «λεία» γραμμή (ευθεία ή πολύ ελαφρά καμπύλη), κατά τη διεύθυνση της εξέλασης.
- Ρήγματα κρατήρα συγκολλήσεων : Γραμμική, απλή είτε αστεροειδούς μορφής (αναζητείστε τον κρατήρα).
- Πόροι χυτών: Μεγάλοι υποεπιφανειακοί πόροι είναι ενδεχόμενο να ανιχνευθούν με μαγνητικά σωματίδια (π.χ. blowholes).
- Ατελής διείσδυση συγκόλλησης: Ενδέχεται να γίνει αντιληπτή σαν φαρδιά, αραιή και χαλαρή συγκέντρωση σωματιδίων.
- Ατελής τήξη συγκόλλησης: Παρουσιάζει σχετικά έντονη ένδειξη, λιγότερο ή περισσότερο συνεκτική (σφικτή), ανάλογα με το βάθος της ασυνέχειας κάτω από την επιφάνεια.
- Σκάσιμο σφυρήλατου (forging burst): Εμφανίζεται σαν απλό είτε αστεροειδές ρήγμα, κοντά στο μέσο της διατομής.

#### **5.14 ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΝΔΕΙΞΕΩΝ**

Συνήθως η καταγραφή των ενδείξεων γίνεται με ένα κατάλληλο σχέδιο, όπου φαίνεται η θέση, το μέγεθος και το είδος της ένδειξης (γραμμική/στρογγυλόμορφη) και ενδεχόμενα και το είδος της ασυνέχειας (ρήγμα, ραφή, ψυχρή επικάλυψη συγκόλλησης κλπ.). Εάν είναι επιθυμητό να σταθεροποιηθεί η ένδειξη πάνω στο αντικείμενο, τότε αρκεί να επικαλυφθεί με ψεκασμό διαυγούς λάκας (lacquer). Στην περίπτωση της ξηρής μεθόδου, πρέπει προηγουμένως να έχουν αφαιρεθεί προσεκτικά τα πλεονάζοντα μαγνητιζόμενα σωματίδια ενώ στην περίπτωση της υγρής, να έχει στεγνώσει ο υγρός φορέας.

Εάν θέλουμε να πάρουμε το αποτύπωμα της ένδειξης και να το κρατήσουμε ως μόνιμη γραφή, τούτο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

- α) Με χρήση διαφανούς πλαστικής ταινίας. Αφού απομακρύνουμε προσεκτικά

τα πλεονάζοντα ξηρά σωματίδια ή αφήσουμε να ξηρανθεί ο υγρός φορέας (ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήσαμε), πιέζουμε στην αρχή απαλά και κατόπιν δυνατά ένα κομμάτι διαφανούς ταινίας πάνω στην ένδειξη και κατόπιν το αφαιρούμε προσεκτικά, ώστε να μην αλλάξει η μορφή της ένδειξης. Η πλαστική ταινία μπορεί να επικολληθεί σε χαρτί (είτε σε γυαλί) και να επισημανθεί κατάλληλα, ώστε να υπάρχει αναφορά και για τη θέση της ένδειξης πάνω στο δοκίμιο.

β) Με χρήση ειδικής διαφανούς λάκας, ή οποία δημιουργεί μία λεπτή μεμβράνη πάνω στην ένδειξη. Είναι διαθέσιμη σε σπρέι και εφαρμόζεται αφού αφαιρεθούν τα πλεονάζοντα ξηρά σωματίδια είτε στεγνώσει ο υγρός φορέας (όπως και στην περίπτωση της διαφανούς ταινίας).

Μια άλλη μέθοδος καταγραφής της ένδειξης είναι η φωτογράφιση της. Είναι δυνατόν να φωτογραφηθεί τόσο μία ορατή ένδειξη όσο και μία φθορίζουσα (αν και σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται ειδικός φωτισμός και εξοπλισμός καθώς και χρήση ειδικής τεχνικής φωτογράφισης).

## **5.15 ΠΡΟ- ΚΑΙ ΜΕΤΑ- ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ**

### **5.15.1 Προκαθαρισμός των δοκιμίων**

Ο **προκαθαρισμός**, στην περίπτωση της μεθόδου Μαγνητικών Σωματιδίων, δεν είναι τόσο κρίσιμος όσο στα Διεισδυτικά Υγρά.

Παρόλα αυτά συνιστάται απομάκρυνση των διαφόρων επικαθήσεων (π.χ. καλαμίνα, scale), της χαλαρής σκουριάς και των χαλαρών προϊόντων οξειδωσης καθώς και των λιπαρών-ελαιωδών ουσιών. Χρώμα και επικάλυψη πρέπει να αφαιρούνται, εάν έχουν πάχος μεγαλύτερο από 5 χιλιοστά της ίντζας (προδιαγραφές ΗΠΑ) είτε 50 μm (βρετανικές προδιαγραφές), παρότι είναι συχνά δυνατό να ανιχνευθούν ασυνέχειες και σε πάχος μπιγιάς μεγαλύτερο από 300 μm (0,3mm).

Ο προκαθαρισμός, στην περίπτωση ξηρής μεθόδου, πρέπει να είναι περισσότερο επιμελής, διότι ενδέχεται τα ξηρά σωματίδια να προσκολληθούν σε υπάρχον φιλμ λαδιού ή και νερού.

Όπως και στην περίπτωση των Διεισδυτικών Υγρών (αλλά όχι τόσο έντονα), προκαθαρισμός με αμμοβολή πάνω σε μαλακά υλικά ενδέχεται να αποκρύψει κάποιες πολύ μικρές, λεπτές και αβαθείς ασυνέχειες.

### 5.15.2 Μετακαθαρισμός των Δοκιμίων

Ο **μετακαθαρισμός** (post-cleaning) είναι απαραίτητος, προκειμένου να απομακρυνθούν τα μαγνητιζόμενα σωματίδια. Συνήθως έπεται της απομαγνήτισης και διενεργείται με σπρέι διαλύτη ή άλλα κατάλληλα μέσα (απολίπανση με ατμό, τρίψιμο με μαλακή βούρτσα και διαλύτη/απορρυπαντικό, λουτρό υπερήχων κλπ). Εάν έχει χρησιμοποιηθεί λευκό υπόστρωμα, πρέπει επίσης να αφαιρεθεί. Συνιστάται επίσης η επικάλυψη των δοκιμίων με αντισκωριακό λάδι, ιδιαίτερα εάν ο υγρός φορέας ήταν νερό.

### 5.16 ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Η εκτεταμένη έκθεση της επιδερμίδας σε υγρό φορέα λαδιού μπορεί να την ξηράνει υπερβολικά (διαλύοντας τα προστατευτικά έλαια που η ίδια παράγει) και να οδηγήσει σε λύση της συνέχειας και ενδεχόμενη δευτερογενή μόλυνση.

Συνιστάται λοιπόν κατά τον έλεγχο, η χρήση κατάλληλης προστατευτικής κρέμας χεριών. Μετά το πέρας της εργασίας πρέπει να πλένονται τα χέρια και τα μπράτσα προσεκτικά με ζεστό νερό και σαπούνι και κατόπιν να γίνεται επάλειψη με ειδική κρέμα χεριών. Συνιστάται επίσης η χρήση ποδιών και γαντιών, προστατευτικών γυαλιών και μάσκας (ιδιαίτερα κατά την εφαρμογή του λευκού υποστρώματος, στα ορατά μαγνητικά σωματίδια). Γάντια και ρούχα νοτισμένα με φορέα λαδιού, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Σημείωση: Οι ανωτέρω προφυλάξεις δεν είναι ειδικές, για τη μέθοδο Μαγνητικών Σωματιδίων. Πρόκειται απλά για επανάληψη των προφυλάξεων που πρέπει να παίρνει κάθε χειριστής του οποίου η εργασία έχει να κάνει με πετρελαιοειδή.

Από άποψη ασφάλειας, είναι απαραίτητα τα κατάλληλα πυροσβεστικά μέσα στο χώρο εργασίας και ο καλός εξαερισμός (φυσικός ή τεχνητός). Όταν χρησιμοποιούμε μαύρο φως, ο τακτικός έλεγχος του φίλτρου για γδαρσίματα είναι απαραίτητος. Όσον αφορά τη χρήση του ηλεκτρισμού, εφαρμόζονται οι γνωστοί γενικοί κανόνες.

Όπως σε όλους τους χώρους εργασίας, συνιστάται η χρήση υποδημάτων ασφαλείας (δεν είναι τόσο απίθανο να μας πέσει ένα δοκίμιο) και όσον αφορά τις εργασίες σε εργοτάξιο, ισχύουν και πάλι οι γνωστοί κανόνες (προστατευτικό κράνος, συνοδός κοντά μας κ.λπ.).

## 5.17 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

### 5.17.1 Έλεγχος των Υλικών

Έλεγχος των υλικών γίνεται κυρίως στις περιπτώσεις ανακυκλούμενων υγρών μαγνητικών σωματιδίων, ορατών είτε φθορίζοντων. Εκτελείται με καθίζηση σε ειδικό ογκομετρικό σωλήνα (π.χ. τύπου Sutherland) και ελέγχεται το καθιζάνον στρώμα σωματιδίων, ανά μονάδα όγκου ορατής είτε φθορίζουσας μελάνης.

Ως ενδεικτικές τιμές αναφέρουμε κατωτέρω αυτές που καθόριζα το βρετανικό πρότυπο BS 4069:1982.

- Μαύρες μελάνες: Καθιζάνον στρώμα μεταξύ 1,25% και 3,5% κατ' όγκο.

- Φθορίζουσες μελάνες: Καθιζάνον στρώμα μεταξύ 0,1% και 0,3% κατ' όγκο.

Ελέγχεται επίσης η ύπαρξη στρώματος άλλων στερεών (συνήθως σκόνης/ ακαθαρσίες).

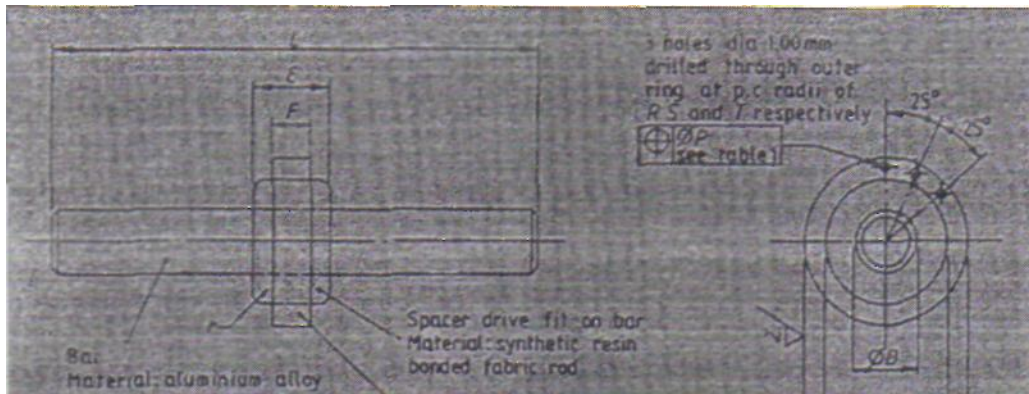
Οι προδιαγραφές συχνά καθορίζουν επίσης τα επιτρεπτά μεγέθη των σωματιδίων (σε ξηρές πούδρες είτε μελάνες) και το σημείο ανάφλεξης του υγρού ορέα (συνήθως μικρότερο ή ίσο των 65°C).

### 5.17.2 Λειτουργικοί Έλεγχοι

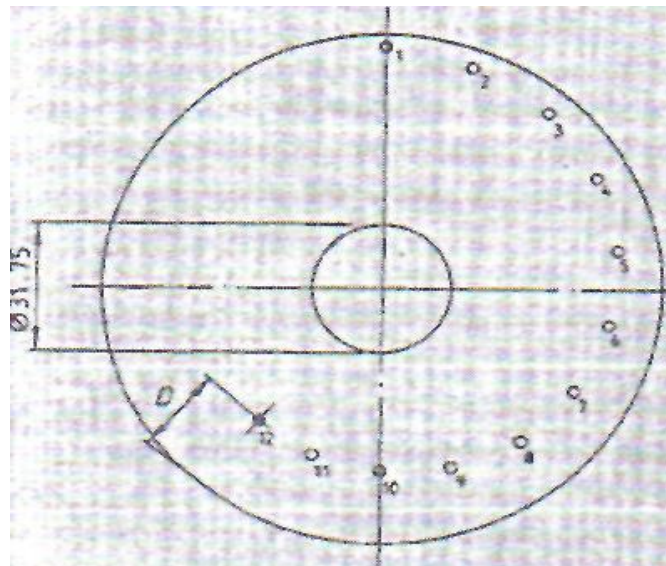
Οι λειτουργικοί έλεγχοι σχετίζονται τόσο με την ποιότητα των υλικών όσο και με τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Λειτουργικός έλεγχος προκειμένου για υγρές μελάνες (ορατές είτε φθορίζουσες) γίνεται με το δοκίμιο της Εικόνας 5.17.2, μέσω ροής ηλεκτρικού ρεύματος στον άξονα του δοκιμίου. Προκειμένου για ξηρές πούδρες, ο έλεγχος γίνεται με το δοκίμιο της Εικόνας 5.17.3, με τεχνική κεντρικού αγωγού και παραμένουσα μαγνήτιση.

Έλεγχος για ξηρές πούδρες και υγρές μελάνες, με τεχνική μαγνητικής ροής (magnetic flux), γίνεται με το πρότυπο δοκίμιο για έλεγχο με μαγνητική ροή, σε μονάδα πάγκου. Το ίδιο δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο τεχνικής μαγνήτισης μέσω πηνίου.

Διαφορετικά δοκίμια ελέγχου είτε διαφορετική χρήση τους, μπορεί να βρεθούν σε διάφορες προδιαγραφές



Εικόνα 5.24: Πρότυπο Δοκίμιο ελέγχου μελανών με ροή ηλεκτρικού ρεύματος



Εικόνα 5.25: Πρότυπο δοκίμιο για έλεγχο ξηράς πούδρας

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. "ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Κ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ" Σύνταξη : Μ. Κ. Κωτούλας "ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ" Βόλος, Αύγουστος 2000
2. "ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Κ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ" Σύνταξη : Μ. Κ. Κωτούλας "ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ" Βόλος, Νοέμβριος 1999
3. "ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Κ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ" Σύνταξη : Μ. Κ. Κωτούλας "ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ" Βόλος, Μάρτιος 2001
4. "ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Κ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ" Σύνταξη : Μ. Κ. Κωτούλας "ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ" (Σημειώσεις Θεωρίας) Βόλος, Ιανουάριος 1999
5. Basic Metallurgy for Non-Destructive Testing, edited by J.L.Taylor, British Institute of Non-Destructive Testing, revision 1996
6. Fundamentals of Non-Destructive Testing, Lesson 1, Introduction to NDT, ASNT, 1977
7. Magnetic Particle Testing, Theory Notes, Lavender International NDT Ltd, ed. 1990
8. Materials and Processes for NDT Technology, ASNT, 1989
9. Non-Destructive Testing Handbook, edited by R.G.McMaster, The Ronald Press, New York, 1959
10. Non-Destructive Testing Handbook, Volume 6, Magnetic Particle Testing, ASNT, 1989
11. Non-Destructive Testing, R. Halmshaw, Ed. Arnold, 2nd edition, 1991
12. Nondestructive Testing: Magnetic Particle Testing, Classroom Training Handbook CT-6-3, General Dynamics, 1977
13. Magnetic Particle Testing - A Practical Guide, DXovejoy, Chapman & Hall, 1993
14. Κ.Κουτίτας, ο πυρήνας της Γης, επισκόπιο της επιστήμης Νο228, Μάιος 1999.
15. Ίδε και Η. Παπαθανάσης, νεομαγνήτες, επισκόπιο της επιστήμης Νο230, Ιούλιος-Αύγουστος 1999.
16. C.E.Betz, Principe of Magnetic Testing, έκδοση της Magnaflux.

