



ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ

Δρ. Βουλγαράκη Χαριτίνη



MSc Welding Engineering & NDT
Mech Eng & Ind. Design, TEIWM



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
&
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2016



1. Η μέθοδος των Δινορρευμάτων

Τα δινορρεύματα είναι μία από τις αναγνωρισμένες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και διασφαλίζουν όπως και οι άλλες μέθοδοι την έγκαιρη ανίχνευση και καθορισμό των ασυνεχειών.

1.1. Ιστορική αναδρομή

Η παρουσία των δινορρευμάτων ανακαλύφθηκε από τον James Maxwell το 1864, ο οποίος όρισε τις εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Το 1879 ο Hughes χρησιμοποίησε το τηλέφωνο σαν μεταδότη ήχου (το 1876 ο Graham Bell εφηύρε και πατένταρε την πρώτη συσκευή –τηλέφωνο- που μετέδιδε τον ήχο και τη φωνή) για να ανιχνεύσει την ανισορροπία ανάμεσα σε δύο ζευγάρια επαγωγικών πηνίων για τον έλεγχο νομισμάτων (Nondestructive Testing Handbook 1986). Εάν συγκριθούν δύο όμοια νομίσματα χρησιμοποιώντας ένα πηνίο στο κέντρο του κάθε νομίσματος τότε θα υπάρχει πλήρης ισορροπία. Εάν όμως είναι φθαρμένα ή παρουσιάζουν διαφορετική θερμοκρασία γίνεται άμεσα αντιληπτό. Ο Hughes κατάφερε να ελέγξει ένα οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό μετρώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική τους διαπερατότητα. Στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ο Hughes χρησιμοποίησε το μέταλλο του χαλκού σαν αναφορά και του έδωσε την τιμή 100 δηλαδή οι τιμές είναι παρόμοιες με αυτές που σήμερα δίνει το Διεθνές Πρότυπο Ανοπτημένου Χαλκού (International Annealed Copper Standard). Επιπλέον έκανε τις καμπύλες κραμάτων δείχνοντας τα αποτελέσματα από τα διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας (ασήμι-χρυσό, χαλκός κασσίτερος, κ.α.). Τέλος, όρισε τις βασικές αρχές ελέγχου και ροής των δινορρευμάτων και του ελέγχου μαγνητικής επαγωγής με τον τρόπο που τα χρησιμοποιούμε μέχρι και σήμερα.

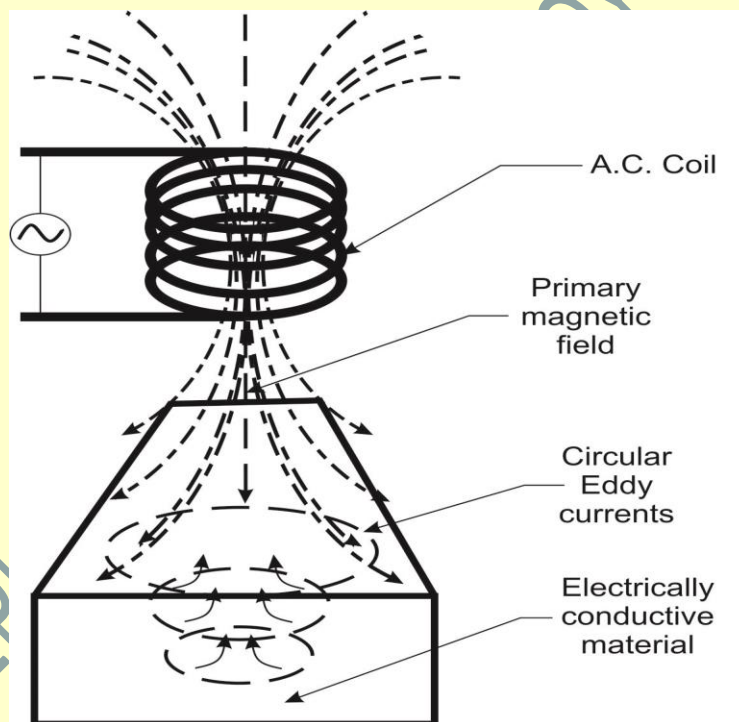
Κοντά στο 1890, ο Charles Proteus Steinmetz δούλεψε στην General Electric και ανέπτυξε απλές μεθόδους ανάλυσης σήματος χρησιμοποιώντας διανύσματα (Nondestructive Testing Handbook 2004). Από το 1925 έως και το τέλος του Β' Παγκοσμίου, το 1945, κατασκευάστηκαν πολλά όργανα δινορρευμάτων (τα οποία κατοχυρώθηκαν σαν πατέντες). Τα πρώτα όργανα υστερούσαν σε ακριβείς μετρήσεις σχετικά με τον προσδιορισμό των ασυνεχειών, της αγωγιμότητας κ.α. Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, οι μέθοδοι (που ανέπτυξε ο Steinmetz) της ανάλυσης σήματος στο μιγαδικό επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στην ανάλυση των σημάτων στη μέθοδο των δινορρευμάτων. Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις σε πολλά επιστημονικά πεδία συνέβαλλαν στην ζήτηση και στην ανάπτυξη νέων τεχνικών ΜΚΕ (Nondestructive Testing Handbook 1986). Η ανάπτυξη της αεροπορικής βιομηχανίας και των πυρηνικών σταθμών οδήγησε στην ανάγκη χρήσης οργάνων υψηλής ευαισθησίας για την αξιολόγηση των μετάλλων και τον αξιόπιστο έλεγχο. Αυτές οι βιομηχανίες ήταν και οι πρώτοι χορηγοί για την έρευνα σε όλες τις Μη Καταστροφικές Δοκιμές (ΜΚΔ).

Η ανάπτυξη της μεθόδου έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1940, όπου ο Friedreich Foerster ίδρυσε το Ίδρυμα Foerster, το οποίο ανέπτυξε και προώθησε πολλές συσκευές δινορρευμάτων (Foerster et al 1943). Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, το ίδρυμα ανέπτυξε μια γραμμή παραγωγής για κάθε εφαρμογή δινορρευμάτων και σε συνεργασία με Αμερικανούς κατασκευαστές (Magnaflux Corporation) καθιέρωσαν τη

μέθοδο στην Αμερική. Επίσης, ένας ακόμη κατασκευαστής ο Intercontrolle στη Γαλλία το 1974, ανέπτυξε τη μέθοδο των πολλών συχνοτήτων. Η ανάπτυξη του μικροεπεξεργαστή στα μέσα της δεκαετίας του 1980, βελτίωσε τη χρήση των συσκευών των δινορρευμάτων (Moore et al 2004).

1.1.1. Αρχή λειτουργίας

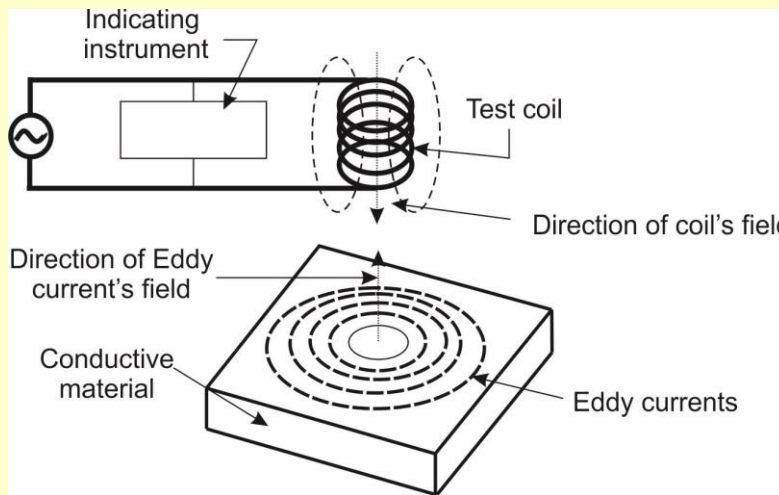
Όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διέρχεται μέσα από ένα πηνίο τότε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διέρχεται μέσα και γύρω από αυτό (Cecco et al 1983, Hagemaiier 1990). Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου συνεχώς μεταβάλλεται με το εναλλασσόμενο ρεύμα. Εάν εισάγουμε ένα αγωγίμο μέταλλο κοντά στο πεδίο τότε επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από αμοιβαία επαγωγή. Εάν το υλικό έχει αντίσταση τότε η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη θα προκαλέσει ρεύματα τα οποία μεταβάλλονται και σχηματίζουν δίνες και για αυτό αποκαλούνται δινορρεύματα. Σύμφωνα με το Νόμο του Lenz, η κατεύθυνση των επαγόμενων δινορρευμάτων και συνεπώς το δευτερεύον πεδίο που δημιουργείται από αυτά αντιτίθεται στην αλλαγή του αρχικού πεδίου (Rao 2007).



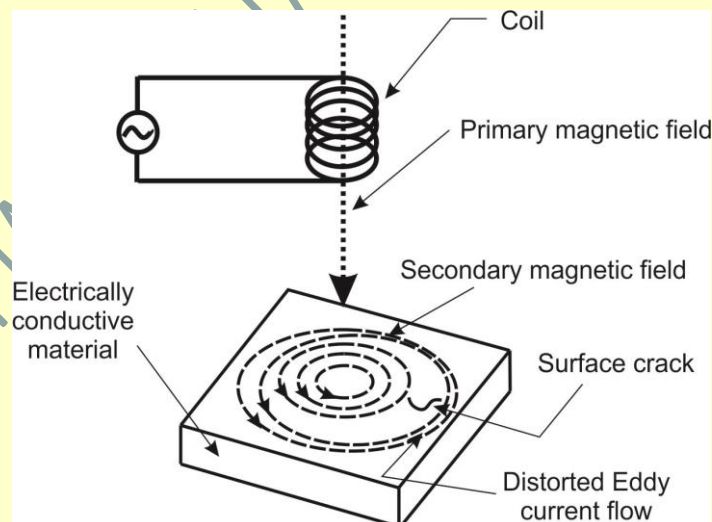
Εικόνα 1. Δημιουργία δινορρευμάτων σε ένα ηλεκτρικά αγωγίμο δοκίμιο (Rao 2007).

Το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα δινορρεύματα αντιτίθεται στο πρωτεύον μαγνητικό πεδίο και προκαλούν μεταβολή στο συνολικό μαγνητικό πεδίο (Rao et al 2013, Hellier 2003). Στη μέθοδο των δινορρευμάτων, το μετρούμενο μέγεθος είναι η σύνθετη αντίσταση του πηνίου και γίνεται προσπάθεια να ερμηνευτούν οι αλλαγές που την προκαλούν (Libby 1979, Franklin 1982, Cecco et al 1983, Hagemaiier 1982). Η παρουσία ασυνέχειας συνοδεύεται από αλλαγές (στην αντίσταση και επαγωγική αντίδραση του πηνίου) καθώς τα δινορρεύματα ρέουν σε

διαφορετική κατεύθυνση από την αρχική. Η διάδοση των δινορρευμάτων σε ένα δεδομένο υλικό επηρεάζεται από τις μεταλλικές ιδιότητες του υλικού, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα, οι τυχόν ασυνέχειες που θα υπάρχουν στο υπό-εξέταση δοκίμιο, η γεωμετρία του δοκιμίου, η συχνότητα διέγερσης που καθορίζει το βάθος διείσδυσης, η γεωμετρία του πηνίου και η απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και στο αγωγίμο δοκίμιο (ανύψωση lift off). (Mukherjee et al 1982, Rao 2007).



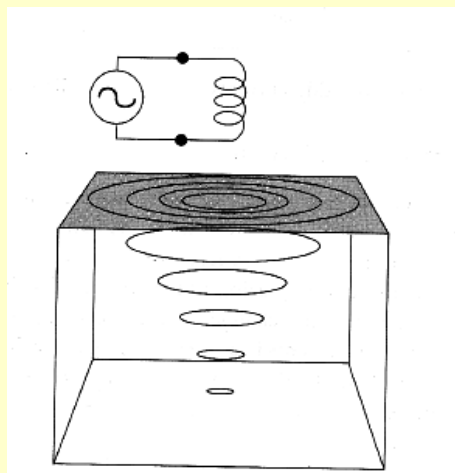
Εικόνα 2. Η ροή των δινορρευμάτων σε αγωγίμο δοκίμιο χωρίς ασυνέχεια (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).



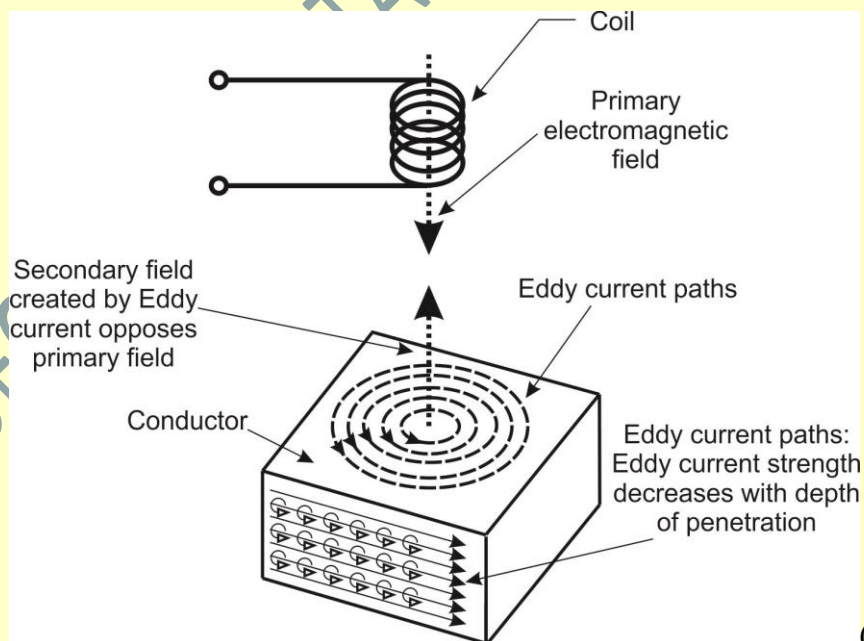
Εικόνα 3. Η μεταβολή της ροής των δινορρευμάτων σε αγωγίμο δοκίμιο με ασυνέχεια (Rao 2007).

Τα δινορρεύματα είναι κλειστοί βρόχοι επαγόμενων ρευμάτων που ταξιδεύουν παράλληλα στις σπείρες του πηνίου και παράλληλα στη μεταλλική επιφάνεια. Τα δινορρεύματα όπως και η μαγνητική ροή κατανέμονται με μεγαλύτερη πυκνότητα

κοντά στην μεταλλική επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Το επιδερμικό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της αμοιβαίας επίδρασης των δινορρευμάτων και εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα. Το φαινόμενο τείνει να συγκεντρώνει τα δινορρεύματα κοντά στην μεταλλική επιφάνεια, ακριβώς κάτω από το πηνίο διέγερσης (Harvey 1995). Επομένως, τα δινορρεύματα δεν κατανέμονται ομοιόμορφα. Είναι ισχυρότερα στην επιφάνεια κάτω από το πηνίο και όσο αυξάνει το βάθος κάτω από την επιφάνεια τόσο μειώνεται η έντασή τους. Επίσης, σε ένα μέταλλο μεγάλου πάχους δεν θα υπάρξει καθόλου ροή των δινορρευμάτων εντός του δοκιμίου παρά μόνο στην επιφάνεια του (Harfield et al 1997).

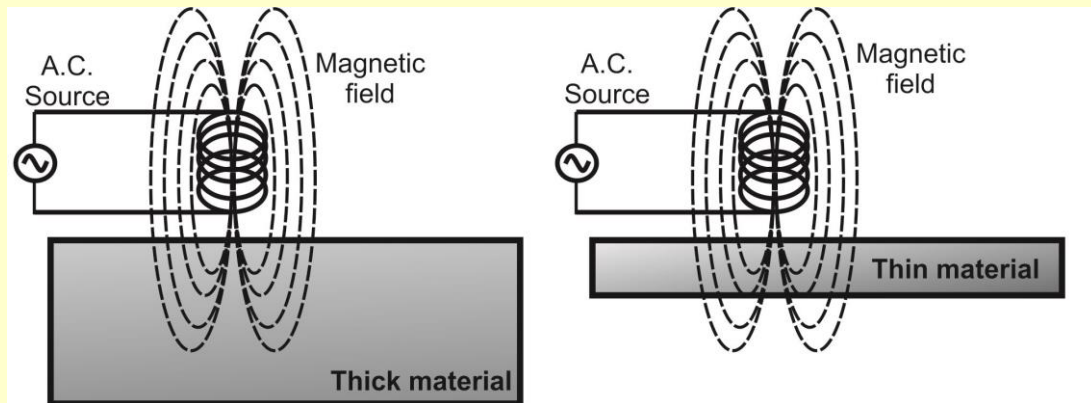


Εικόνα 4. Τα δινορρεύματα μέσα σε ένα αγωγίμο δοκίμιο (Rao 2007).



(β)

Εικόνα 5. Η μείωση της έντασης των δινορρευμάτων καθώς αυξάνεται το βάθος (επιδερμικό φαινόμενο) (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).



Εικόνα 6. Τα δινορρεύματα μέσα σε ένα αγώγιμο δοκίμιο μεγάλου πάχους και μέσα σε ένα λεπτό αγώγιμο δοκίμιο (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).

Το βάθος διείσδυσης ποικίλει ανάλογα με το υλικό του μετάλλου. Συγκεκριμένα, το βάθος διείσδυσης επηρεάζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα τόσο μεγαλύτερη και η ευαισθησία στις επιφανειακές ασυνέχειες αλλά τόσο λιγότερη διείσδυση στο υπό-εξέταση υλικό. (Η επίδραση της μαγνητικής διαπερατότητας είναι αμελητέα στα μη σιδηρομαγνητικά υλικά. Επίσης στα σιδηρομαγνητικά υλικά εάν τα μαγνητίσουμε και τα οδηγήσουμε σε κορεσμό με dc πηνίο πάλι η επίδραση της μαγνητικής διαπερατότητας θα είναι ελάχιστη). Καθώς η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυξάνει, αυξάνουν και τα σήματα θορύβου από τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας και αυτό ενισχύεται με την αύξηση του βάθους (Nondestructive Testing Handbook 2004).

Στα δινορρεύματα είναι πολύ σημαντικό να επιτυγχάνεται η διείσδυσή τους σε αναμενόμενο βάθος. Ο παράγοντας που επηρεάζει το βάθος διείσδυσης είναι η συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το πρότυπο βάθος διείσδυσης. Επομένως, το βάθος μειώνεται όσο η συχνότητα αυξάνεται. Στις υψηλές συχνότητες, η ευαισθησία είναι πολύ υψηλή αλλά το βάθος διείσδυσης περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα κάτω αλλά πολύ κοντά στην επιφάνεια έτσι ώστε τα πιο βαθιά κομμάτια δεν μπορούν να ανιχνευθούν, αλλά έχει αυξηθεί η ευαισθησία των δινορρευσμάτων σε επιφανειακές ασυνέχειες. Στις χαμηλές συχνότητες το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο αλλά η ευαισθησία στην ανίχνευση ασυνεχειών μειώνεται και πολλές μικρές ασυνέχειες είναι μη ανιχνεύσιμες αλλά τα δινορρεύματα διεισδύουν σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στο υλικό. Η επιλογή πρέπει να γίνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων και όχι απαραίτητα σε μια συγκεκριμένη τιμή λόγω του ότι σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων η ευαισθησία εντοπισμού είναι περίπου ίδια. Επιπλέον, τα σήματα των δινορρευσμάτων που προκύπτουν από τη σάρωση της κεφαλής πάνω από ασυνέχεια εξαιτίας της απόστασης του πηνίου από το δοκίμιο, της αγωγιμότητας και της μαγνητικής διαπερατότητας είναι διαφορετικής έντασης και διαφορετικής φάσης. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα του εντοπισμού με ακρίβεια μιας εσωτερικής ασυνέχειας



σε σχέση με μια επιφανειακή. Το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στα δινορρεύματα ποικίλουν από μερικά Hz σε μερικά MHz. Η επιλογή γίνεται με στόχο την παροχή του μέγιστου σήματος. Επειδή όμως, υπάρχει μια σειρά από μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δινορρευμάτων, η βέλτιστη συχνότητα καθορίζεται έπειτα από την διεξαγωγή πειραμάτων. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή συχνότητας είναι το πάχος του υπό εξέταση δοκιμίου και το επιθυμητό βάθος διείσδυσης (Cecco et al 1983).

Ως πρότυπο βάθος διείσδυσης δ (standard depth of penetration), ορίζεται το βάθος στο οποίο η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται στο $1/e=37\%$ της τιμής τους στην επιφάνεια του υλικού (Udpa et al 1999). Η πυκνότητα των δινορρευμάτων για ένα, δύο και τρία πρότυπα βάθη διείσδυσης:

$$1\delta \rightarrow 1/e = 1/2.71828 = 0.368 = 36.8\%$$

$$2\delta \rightarrow 1/e^2 = 1/7.38906 = 0.135 = 13.5\%$$

$$3\delta \rightarrow 1/e^3 = 1/20.08554 = 0.0498 = 5.0\%$$

Εάν ξεπεράσουμε τα τρία πρότυπα βάθη, η πυκνότητα είναι τόσο μικρή που δεν μπορεί να δώσει σήμα.

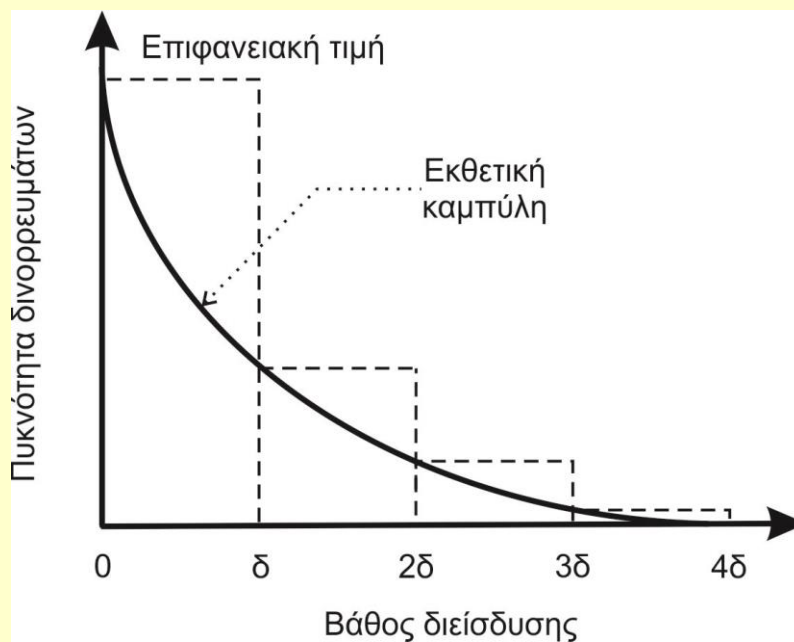
Το πρότυπο βάθος διείσδυσης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

όπου f είναι η συχνότητα,

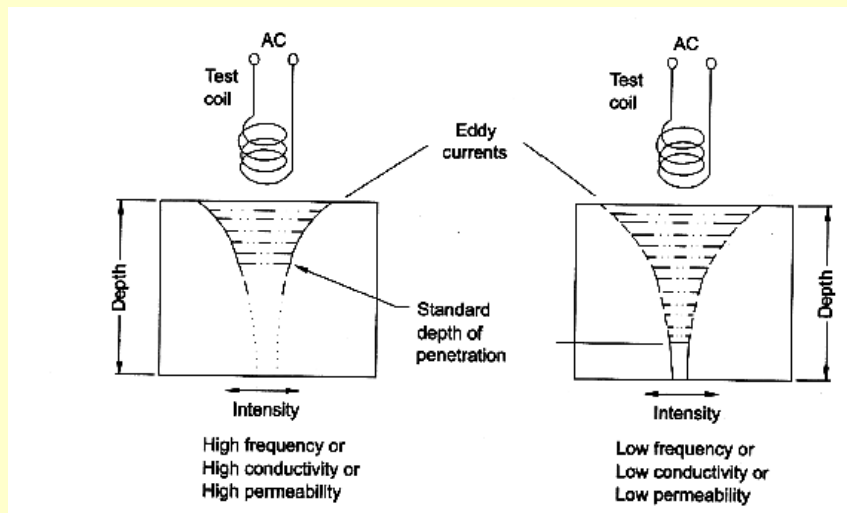
σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα,

μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα ($\mu = \mu_r \mu_0$, μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα και $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ J/K}$).

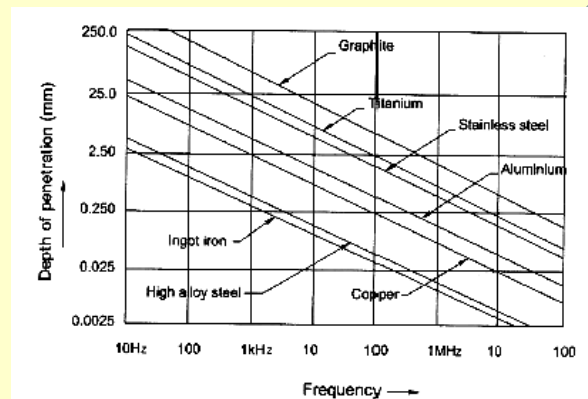


Εικόνα 7. Η πυκνότητα των δινορρευσμάτων σε σχέση με το πρότυπο βάθος διείσδυσης δ .

Το βάθος διείσδυσης όπως φαίνεται και από τον τύπο 1, εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη μαγνητική διαπερατότητα και τη συχνότητα στο υπό εξέταση δοκίμιο. Για ένα δεδομένο υλικό η συχνότητα είναι αυτή που καθορίζει το βάθος διείσδυσης των δινορρευσμάτων καθώς και την αλληλεπίδραση των δινορρευσμάτων με τις ασυνέχειες σε διαφορετικά βάθη. Εάν θέλουμε να επιτευχθεί μεγάλη διείσδυση σε υψηλά αγωγίμες πλάκες πρέπει να χρησιμοποιηθούν χαμηλές συχνότητες. Αντίθετα, υψηλές συχνότητες πρέπει να επιλεγούν σε περιπτώσεις μελέτης επιφανειακών χαρακτηριστικών ή λεπτών μεταλλικών πλακών. Επιπλέον, πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα δινορρεύματα δεν σταματούν στο πρότυπο βάθος διείσδυσης αλλά συνεχίζουν να κατανέμονται και σε μια απόσταση πιο κάτω από αυτό. Εάν το πρότυπο βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο από το πάχος του δοκιμίου τότε αυτός ο περιορισμός θα παρουσιαστεί ως αλλαγή στην αγωγιμότητα του υλικού. Συνήθως, το υλικό πρέπει να έχει πάχος δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από το πρότυπο βάθος διείσδυσης (Halmshaw, 1993). Η παραπάνω εικόνα δείχνει το πρότυπο βάθος διείσδυσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα για διάφορα μέταλλα (για παράδειγμα στη συχνότητα των 100kHz το βάθος διείσδυσης για το χαλκό είναι 0.25mm και για το τιτάνιο είναι 25mm).



(α)



(β)

Εικόνα 8. (α) Το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων σε δύο διαφορετικές καταστάσεις και (β) το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων σε διαφορετικά υλικά σε σχέση με τη συχνότητα (B.P.C. Rao 2007).

Το πρότυπο βάθος είναι έγκυρο για αγωγίμα δοκίμια με μεγάλα πάχη και μεγάλα πηνία (Hagemaiier 1985, Cartz 1995). Έστω ό,τι υπάρχει ένα αγωγίμο δοκίμιο με πάχος πέντε φορές το πρότυπο βάθος διείσδυσης, όπου η πυκνότητα των δινορρευμάτων είναι μόνο 0.67% της επιφανειακής πυκνότητας. Τότε η επίδραση από το πάχος είναι τόσο μικρή που το μόνο που επηρεάζει τα δινορρεύματα είναι το μέγεθος του πηνίου. Σε αυτήν την περίπτωση, το πεδίο των δινορρευμάτων που δημιουργείται, περιορίζεται από τη διάμετρο του πηνίου. Επομένως, όταν το πηνίο είναι πολύ μικρό η πυκνότητα του ρεύματος για ένα δεδομένο βάθος θα είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται από το πρότυπο βάθος διείσδυσης. Το ενεργό βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων καθορίζεται σαν το βάθος στο οποίο η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται στο 5% από την επιφανειακή πυκνότητα.

Η ροή των δινορρευμάτων περιορίζεται στην περιοχή του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου το οποίο είναι ανάλογο με τη γεωμετρία του πηνίου (Rao 2007). Η περιοχή ελέγχου της κεφαλής είναι η περιοχή κάτω από το πηνίο μαζί με μια ακόμη περιοχή η



οποία εξαρτάται από τη συχνότητα που χρησιμοποιούμε. Αυτή η περιοχή ονομάζεται D_e και υπολογίζεται προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_e = D_c + 4\delta$$

D_c είναι η διάμετρος του πηνίου και δ είναι το βάθος διείσδυσης.

Στις υψηλές συχνότητες ο όρος 4δ γίνεται αμελητέος και επομένως η περιοχή ελέγχου καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη διάμετρο του πηνίου. Η διείσδυση και η ευαισθησία, όσον αφορά τη γεωμετρία του πηνίου επηρεάζονται από αντίθετες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, η ευαισθησία για μικρές ασυνέχειες περιορίζει τη διάμετρο του πηνίου ώστε να έχει το ελάχιστο μήκος όσο θα είναι κατά μήκος της ασυνέχειας που θα ανιχνευθεί και από την άλλη η διείσδυση των δινορρευμάτων περιορίζεται από τη διάμετρο του πηνίου, η οποία καθορίζει το βάθος διείσδυσης (όσο η διάμετρος του πηνίου). Συνεπώς τα πηνία (κεφαλές) μεγάλης διαμέτρου παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα αλλά επιτυγχάνουν γρήγορη επιθεώρηση.

Οι διαστατικοί παράγοντες του πηνίου που επηρεάζουν τα δινορρεύματα, που επάγονται στο υλικό, είναι η απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και στο υπό εξέταση δοκίμιο (lift-off), το μέγεθος και το σχήμα του πηνίου.

Όταν ένα πηνίο είναι στον αέρα πάνω από ένα αγωγίμο δοκίμιο, η σύνθετη αντίσταση του πηνίου έχει μια συγκεκριμένη τιμή. Καθώς το πηνίο μεταφέρεται πιο κοντά στο αγωγίμο δοκίμιο η τιμή αυτή αλλάζει καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση με το υπό εξέταση δοκίμιο. Η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται εκθετικά με την απόσταση του πηνίου από το αγωγίμο δοκίμιο, με άμεση συνέπεια την αύξηση της ευαισθησίας της μεθόδου (Mix 2005). Όσο πιο κοντά βρίσκεται το πηνίο με το υπό εξέταση δοκίμιο, τόσο πιο πυκνά θα είναι το πεδίο των δινορρευμάτων που θα αναπτυχθεί.

Σημαντική είναι και η διάκριση μεταξύ απόλυτων και διαφορικών πηνίων. Το απόλυτο πηνίο ανταποκρίνεται στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου που γίνονται στο δοκίμιο χωρίς να συγκρίνεται η απόκρισή του με ένα δεύτερο πηνίο. Στην απόλυτη μέτρηση, τα αποτελέσματα είναι οι αντιπροσωπευτικές αλλαγές στο υπό εξέταση δοκίμιο. Ένα πρόβλημα του απόλυτου πηνίου (απόλυτη κεφαλή) είναι η δυσκολία που έχει να ανιχνεύει μικρές αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση. Τα διαφορικά πηνία είναι 2 ή περισσότερα πηνία που συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε οι ηλεκτρομαγνητικές αλλαγές να προκαλούν μια ανισορροπία μεταξύ τους, η οποία πρέπει να αναλυθεί. Στις διαφορικές μετρήσεις, τα αποτελέσματα είναι σχετικά καθώς είναι η διαφορά που προκύπτει από τη μέτρηση των δύο διαφορετικών περιοχών.

Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη μέθοδο των δινορρευμάτων είναι η ευαισθησία, η διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης.

Συγκεκριμένα, η ευαισθησία είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στη μέθοδο των δινορρευμάτων καθώς καθορίζει το μικρότερο μέγεθος ασυνέχειας που μπορεί να



ανιχνευτεί μέσα σε ένα δεδομένο πάχος αγωγίμου δοκιμίου. Η ευαισθησία της μεθόδου μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση στην οποία εντοπίζεται η πιθανή ασυνέχεια διότι εξαρτάται από την πυκνότητα των δινορρευμάτων στη θέση που βρίσκονται ασυνέχειες (Moore et al 2004). Η διαδικασία εντοπισμού ασυνεχειών είναι πιο δύσκολη όταν το δοκίμιο που ελέγχεται είναι σιδηρομαγνητικό καθώς υπάρχει μια επιπρόσθετη μείωση στην αυτεπαγωγή του πηνίου καθώς η ένταση των δινορρευμάτων μειώνεται στο εσωτερικό του δοκιμίου αλλά υπάρχει και μια επιπλέον μείωση της αυτεπαγωγής του πηνίου λόγω της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. (Γενικά όταν υπάρχει σιδηρομαγνητικό υλικό η αυτεπαγωγή του πηνίου μειώνεται και αυτό συνοδεύεται από αύξηση της αντίστασης που οφείλεται στα δινορρεύματα και στις απώλειες λόγω της μαγνητικής υστέρησης). Οι αλλαγές που προκύπτουν από τις ασυνέχειες σε ένα δοκίμιο είναι συχνά πολύ μικρές σε σχέση με τη δεδομένη τιμή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου. Η ευαισθησία είναι μέγιστη όταν οι ασυνέχειες είναι κάθετες στη ροή των δινορρευμάτων και ελάχιστη όταν η ασυνέχεια είναι παράλληλη στα δινορρεύματα ή όταν βρίσκεται στο κέντρο του πηνίου. Μεγαλύτερη ευαισθησία επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή συχνότητας ανάλογα με το βάθος εντοπισμού της ασυνέχειας.

Αλλαγή του σήματος και συγκεκριμένα μεταβολή της ροής των δινορρευμάτων συμβαίνει όταν βρεθούν σε κάποια άκρη ή στο τέλος ενός δοκιμίου, καθώς δεν έχουν διαδρομή να κινηθούν. Το αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής πορείας των δινορρευμάτων είναι γνωστή ως “φαινόμενο άκρου” (edge effect). Το πηνίο αντιλαμβάνεται την άκρη σαν μια μεγάλη ρωγμή ή σαν οπή και το σήμα που προκύπτει είναι πολύ ισχυρό. Τα όρια που πρέπει να τηρούνται για την απόσταση που πρέπει να έχει το πηνίο από την άκρη καθορίζεται από το μέγεθος του πηνίου (Cox 1997). Επίσης, η ανίχνευση ασυνεχειών όπως ρωγμές που εντοπίζονται κοντά στις άκρες ή στις οπές για τους ήλους συναρμογής στα αεροσκάφη είναι δύσκολη καθώς υπάρχει παρεμβολή σήματος από το φαινόμενο άκρου η οποία πρέπει να εξαλειφθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σταθερή διατήρηση της απόστασης μεταξύ του πηνίου και της άκρης. Εάν η απόσταση παραμείνει ίδια τότε η απόκριση των δινορρευμάτων θα είναι ίδια εκτός και αν υπάρχει κάποια ασυνέχεια, η οποία θα προκαλέσει αλλαγή στην ένδειξη του οργάνου.

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις κεφαλές δινορρευμάτων κατανέμεται σε όλες τις κατευθύνσεις από το πηνίο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκιμίου επηρεάζουν τη ροή των δινορρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων. Άκρες, γωνίες, δύσκολες γεωμετρίες επηρεάζουν τη ροή των δινορρευμάτων. Καθώς το πηνίο προσεγγίζει τις δύσκολες γεωμετρίες, η κεφαλή δεν μπορεί να μετρήσει σωστά το σήμα από τα δινορρεύματα καθώς αυτά δεν μπορούν να ρέουν πέρα από την άκρη. Αυτό περιορίζει την έντασή τους και προκαλεί αλλαγές στη ροή τους.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τα δινορρεύματα είναι η θερμοκρασία καθώς επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και συνεπώς την ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων. Η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, επηρεάζεται και η ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου καθώς και αυτή αυξάνεται γραμμικά με τη θερμοκρασία. Επομένως, εάν υπάρξει αλλαγή



στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια ελέγχου, το τελικό σήμα από το όργανο των δινορρευσμάτων αλλάζει λόγω των αλλαγών που γίνονται στην ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου και των καλωδίων. Αυτό χαρακτηρίζεται ως θερμοκρασιακή απόκλιση. Αυτή η επίδραση μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση διαφορικών κεφαλών ή πηνίων που αντισταθμίζουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

1.2 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η υψηλή ταχύτητα ελέγχου, η ακριβής μέτρηση αγωγιμότητας, η ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών, η υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση μικρών ασυνεχειών, τα άμεσα αποτελέσματα μέτρησης, η ακριβής μέτρηση πάχους επικάλυψης, ο χαμηλός κόστους φορητός εξοπλισμός (Θεοδουλίδης 2011).

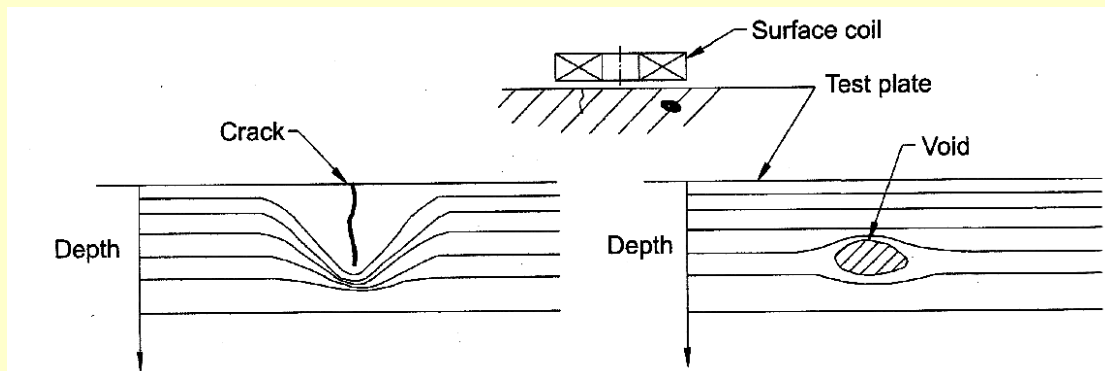
Οι περιορισμοί της μεθόδου είναι το περιορισμένο βάθος διείσδυσης, οι πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν συγχρόνως το σήμα εξόδου, το γεγονός ότι ο εντοπισμός των ασυνεχειών είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός, ότι το υλικό πρέπει να είναι αγωγίμο και ότι πολλές μη σχετικές ενδείξεις μπορεί να προκύψουν από φαινόμενα άκρου ή από δύσκολες γεωμετρίες.

1.3.Εφαρμογές

Η ανάπτυξη της μεθόδου των δινορρευσμάτων έχει πολλές εφαρμογές εξαιτίας της μεγάλης τους ευαισθησίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για:

- Μέτρηση διακυμάνσεων αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας.
- Ανίχνευση ασυνεχειών.
- Μέτρηση απόστασης μεταξύ δοκιμίου και πηνίου (ανύψωση lift off).
- Παχυμέτρηση.
- Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε αγωγίμες πλάκες.

Η μέθοδος των δινορρευσμάτων είναι κατάλληλη για ανίχνευση επιφανειακών και κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών αγωγίμων υλικών καθώς και για μέτρηση της απόστασης πηνίου δοκιμίου για τον υπολογισμό του πάχους επικάλυψης των αγωγίμων υλικών. Το πλάτος και η φάση της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης δίνει πληροφορίες για την ανίχνευση και χαρακτηρισμό των ασυνεχειών όπως μήκος, πλάτος, βάθος, σχήμα και μέγεθος (Shull 2002).



Εικόνα 9. Η μεταβολή της διάδοσης των δινορρευμάτων σε σχέση με την ασυνέχεια που εντοπίζουν (Rao 2007).

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι οι ασυνέχειες με κατεύθυνση κάθετη στη ροή των δινορρευμάτων προκαλούν μέγιστη μεταβολή στη ροή δινορρευμάτων και ανιχνεύονται με τη μέγιστη ευαισθησία.

Το βασικό πρόβλημα στα δινορρέυματα είναι η σωστή ερμηνεία της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης του πηνίου, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (Bettaieb et al 2010). Επίσης, θα πρέπει οι έλεγχοι που γίνονται στα δοκίμια να είναι σε περιοχές που δεν επηρεάζονται από μαγνητικές ή ηλεκτρικές διακυμάνσεις. Σε μερικές εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως στη χρήση μαγνητομέτρου SQUID πρέπει οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό εκτός από το υπό-εξέταση δοκίμιο να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το πηνίο.

Στον έλεγχο με δινορρέυματα οι ασυνέχειες μεταβάλλουν τη ροή των δινορρευμάτων, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μεγάλη αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Ασυνέχειες που δεν προκαλούν αλλαγές στη διάδοση των δινορρευμάτων ανιχνεύονται με μεγάλη δυσκολία. Η διακριτική ικανότητα, είναι ο βαθμός διάκρισης ανάμεσα σε διαφορετικά σήματα, μαζί με την ευαισθησία της μεθόδου παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανίχνευση μικρών ασυνεχειών και πολλές φορές τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται και από το μέγεθος του πηνίου (Rao 2007).

Η ικανότητα ανίχνευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κεφαλή που χρησιμοποιείται. Με κατάλληλη επιλογή κεφαλής μια ρωγμή μπορεί να ανιχνευτεί με σχετική ευκολία. Επίσης, οι διαστάσεις των ασυνεχειών μπορεί να ποικίλουν μέσα σε ένα δοκίμιο, μπορεί να είναι πολύ μικρές, μεσαίες ή πολύ μεγάλες. Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί η μέθοδος των δινορρευμάτων να ανιχνεύσει όλες τις ρωγμές που υπάρχουν σε ένα δοκίμιο. Επίσης, η ενίσχυση της διακριτικής ικανότητας γίνεται στις υψηλές συχνότητες. Με τη μέθοδο των δινορρευμάτων το ζητούμενο είναι η ανίχνευση των ασυνεχειών αλλά και η διαστασιολόγησή τους μαζί με τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης τους. Σημειώνεται ότι η γωνία της φάσης καθορίζει το βάθος ή την τοποθεσία της ασυνέχειας με αναφορά την απόσταση της μεταλλικής επιφάνειας με το πηνίο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγεθος του σήματος και η γωνία φάσης του χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τη διαστασιολόγηση των ασυνεχειών. Το πλάτος του σήματος είναι ένας δείκτης που δίνει πληροφορίες για την ένταση της ασυνέχειας.

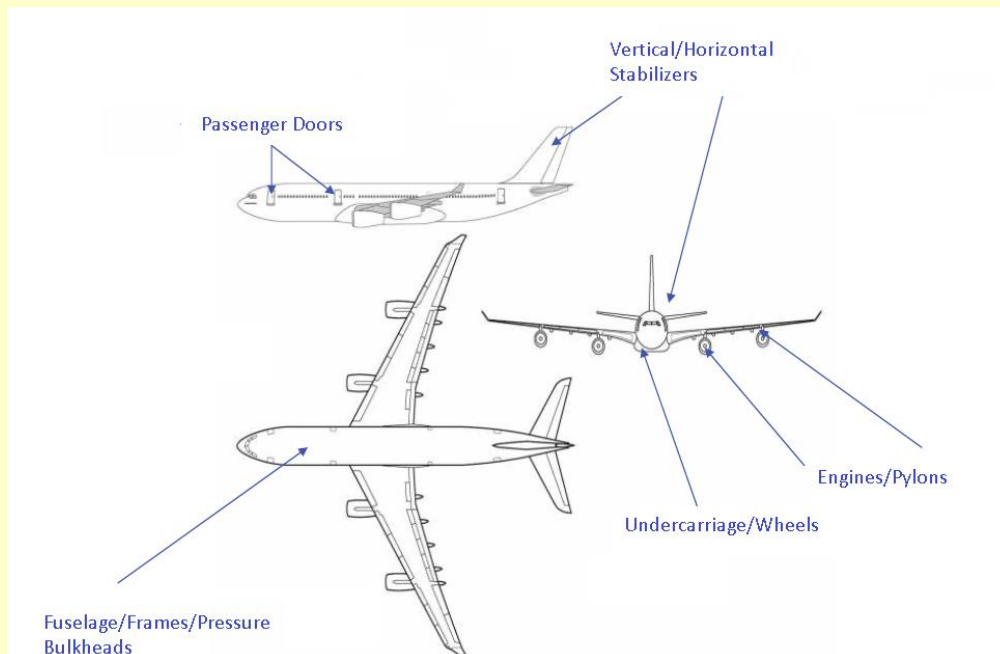


Ο έλεγχος με δινορρεύματα είναι πολύ αξιόπιστος και δεν είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες επιπλέον διαδικασίες όπως να αφαιρεθεί η επικάλυψη (όπως στα διεισδυτικά υγρά). Επιπλέον, ο έλεγχος αποκαλύπτει μικρές ρωγμές με τη χρήση υψηλών συχνοτήτων για αυτό και μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις ελέγχου όπως η επιθεώρηση σωλήνων σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνικά ή συμβατικά) καθώς και σε γενικές περιπτώσεις επιθεώρησης σωληνώσεων, συρματόσχοινων, αεροσκαφών κ.α. Επίσης, με τον έλεγχο των δινορρευμάτων μπορεί να γίνει κατάταξη μετάλλων καθώς όταν ένα πηνίο τοποθετηθεί πάνω από ένα αγωγίμο υλικό προκύπτει μια συγκεκριμένη τιμή σύνθετης αντίστασης. Επομένως, οποιοδήποτε δοκίμιο από το ίδιο αγωγίμο υλικό θα προκαλεί την ίδια τιμή στη σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Με παρόμοιο τρόπο γίνονται αξιόπιστα και μετρήσεις επικαλύψεων. Συγκεκριμένα, για να επιτευχθούν μετρήσεις επικάλυψης, θα πρέπει το πηνίο να τοποθετηθεί πάνω σε υλικό με γνωστό πάχος επικάλυψης καθώς τότε η σύνθετη αντίσταση έχει μια συγκεκριμένη τιμή-“πάχος”. Συνεπώς, οποιαδήποτε αλλαγή στην ένδειξη της τιμής της σύνθετης αντίστασης θα σημαίνει και αλλαγή στο πάχος της επικάλυψης.

Η παρούσα διατριβή μελετά εφαρμογές επιθεώρησης με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στα αεροπλάνα (εστιάζοντας στην ανίχνευση ρωγμών) και για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια μικρή αναφορά σε αυτές.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος των δινορρευμάτων για την ανίχνευση ρωγμών στην αεροπορική βιομηχανία χρησιμοποιείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η πλειοψηφία του εξοπλισμού είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες (10 kHz έως και 1MHz) για ανίχνευση πολύ μικρών επιφανειακών ασυνεχειών. Το 1973 καθορίστηκε ότι τα δινορρεύματα είναι πιο ευαίσθητη μέθοδος και από τη ραδιογραφία στην ανίχνευση ρωγμών από κόπωση (Southworth 1973, Anderson et al 1973). Αυτό αποτέλεσε και το εφαλτήριο για τη χρήση των δινορρευμάτων σε εντοπισμό υπό-επιφανειακών ρωγμών. Τη δεδομένη χρονική περίοδο όμως δεν υπήρχαν συσκευές δινορρευμάτων που λειτουργούσαν σε χαμηλή συχνότητα (100 Hz έως 10kHz) και επιπλέον οι κεφαλές είχαν μεγάλη διάμετρο με αποτέλεσμα να υστερούν σε ευαισθησία ανίχνευσης μικρών ρωγμών. Ο έλεγχος σε χαμηλές συχνότητες με τη μέθοδο των δινορρευμάτων έγινε αξιόπιστος με τη χρήση οργάνων που χρησιμοποιούσαν ανάλυση φάσης. Επιπλέον, οι κατασκευαστές πέτυχαν τη μείωση της τιμής της συχνότητας λειτουργίας στα 60Hz σε συνδυασμό με τη μείωση και του μεγέθους των κεφαλών.

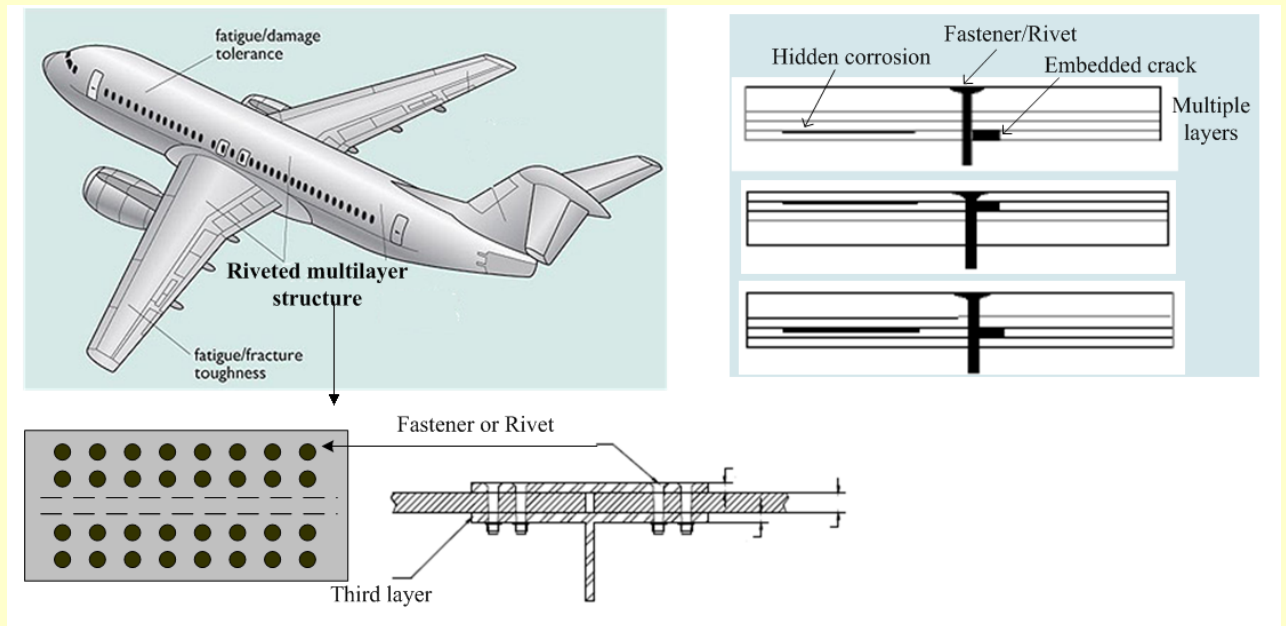
Οι πιο συνηθισμένες περιοχές ελέγχου στα αεροπλάνα είναι ο έλεγχος του σκάφους του (άτρακτος και πτερύγια) κυρίως από διάβρωση, το σύστημα προσγείωσης από τις πιέσεις που δέχεται κατά την προσγείωση στους άξονες και τροχούς, το σύστημα του μηχανικού εξοπλισμού και οι οπές συναρμογής με ή χωρίς ήλους. Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν τις περιοχές αυτές δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον έλεγχο των οπών συναρμογής.



Εικόνα 10. Τυπικές περιοχές ελέγχου στα αεροσκάφη (GE Inspection Technologies 2008).



Εικόνα 11. Εφαρμογές ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στα αεροσκάφη (Rao 2013).



Εικόνα 12. Έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στις οπές συναρμογής στα αεροσκάφη (Yang et al 2013).

1.4.Βιβλιογραφικές Αναφορές

Όλες οι βιβλιογραφικές αναφορές στα Δινορρεύματα είναι από τη Διδακτορική Διατριβή της Δρ.Βουλγαράκης Χαριτίνης.