



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ



ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΔΑΜΑΛΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Α.Μ. 6817)
ΚΟΥΚΟΥΖΕΛΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ (Α.Μ. 6622)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (Δρ. Μηχ.)

ΠΑΤΡΑ 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου με έδρα την Πάτρα και αφορά στο σχεδιασμό και την κατασκευή μιας διάταξης για επαγωγική θέρμανση μετάλλων.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή κ. Δρ. Ρωμαίο Αλέξανδρο , ο οποίος με την κατάλληλη καθοδήγησή του βοήθησε στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουν επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Δαμάλας Κωνσταντίνος

Κουκουζέλης Λάμπρος

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τον όρο Επαγωγική Θέρμανση γίνεται συνήθως αναφορά στη διαδικασία θέρμανσης ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού χωρίς επαφή. Υψηλής συχνότητας ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθεί θερμότητα. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατασκευή μιας συσκευής η οποία χρησιμοποιεί μη συμβατική μέθοδο επαγωγικής θέρμανσης. Η ταχύτερη ανάπτυξη της θερμοκρασίας του δοκιμίου στα πειράματα καθιστούν αυτή τη συσκευή αρκετά αποδοτική. Μέσα από τις κατάλληλες μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας, επιτυγχάνονται ποσοστά απόδοσης έως και 80% με τη χρήση συγκεκριμένου υλικού δοκιμίου. Η κατάλληλη χρήση οργάνων, εξαρτημάτων καθώς και ο σχεδιασμός βοηθούν στην πλήρη λειτουργικότητά της.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται κυρίως στη θεωρία της επαγωγικής θέρμανσης, στο μαγνητισμό και στη θέρμανση μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Οι αρχές αυτών των θεωριών είναι θεμελιώδεις με βάση την ολοκληρωμένη λειτουργία της συσκευής. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο δύο, αναφέρεται λεπτομερώς μία διάταξη επαγωγικής θέρμανσης και η πλήρης ηλεκτρική της συστοιχία (π.χ. πυκνωτής, αντιστροφέας, κ.λ.π.). Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στα πηνία. Το πηνίο και η λειτουργία του στη συσκευή είναι ένα από τους καθοριστικότερους παράγοντες για τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής. Ένα από τα σημαντικότερα τμήματα αλλά όχι ακριβές τμήμα της συσκευής αποτελεί το αντικείμενο θέρμανσης. Στην ουσία είναι το κομμάτι χάλυβα το οποίο θερμαίνεται στα πειράματα της εργασίας και με βάση αυτό πραγματοποιούνται και οι μετρήσεις. Αυτό αναλύεται λεπτομερώς στο τέταρτο κεφάλαιο. Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στη μετάδοση της ενέργειας και πιο συγκεκριμένα της θερμότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται οι κατάλληλες θεωρίες και εξισώσεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ενεργειακό ισοζύγιο. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται ολόκληρος ο σχεδιασμός και η κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται λεπτομερώς όλα τα τμήματα και εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης καθώς και η λειτουργία τους. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο αποτυπώνονται οι μετρήσεις των πειραμάτων και οι αναλύσεις αυτών. Επιπλέον, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την κατασκευή και λειτουργία της συσκευής και προτείνονται κάποιες μελλοντικές τροποποιήσεις.

Λέξεις κλειδιά: Επαγωγική θέρμανση, συσκευή επαγωγικής θέρμανσης, πηνίο

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|---------------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | iii |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | v |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ..... | - 12 - |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 12 - |
| 1.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΓΕΝΙΚΑ | - 13 - |
| 1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ | - 13 - |
| 1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ | - 15 - |
| 1.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ. | - 15 - |
| 1.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ..... | - 16 - |
| 1.7 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ | - 16 - |
| 1.8 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ. | - 17 - |
| 1.9 ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ | - 18 - |
| 1.10 ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ | - 18 - |
| 1.11 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ..... | - 19 - |
| 1.12 ΑΡΧΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ | - 21 - |
| 1.13 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ..... | - 21 - |
| 1.14 ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ Μ - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Τ | - 22 - |
| 1.15 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (MAGNETIC PERMEABILITY)..... | - 24 - |
| 1.16 ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ (DOMAIN THEORY). | - 25 - |
| 1.17 ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ - ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ..... | - 26 - |
| 1.18 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ (EDDY CURRENT LOSSES). | - 27 - |
| 1.19 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY - ΤΑΣΗ ΕΞ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ. | - 28 - |

| | | |
|------|---|--------|
| 1.20 | ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ (SKIN EFFECT)..... | - 30 - |
| 1.21 | ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ..... | - 30 - |
| 1.22 | ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ..... | - 32 - |
| 1.23 | ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΣ ΡΕΥΜΑ..... | - 33 - |
| 1.24 | ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ..... | - 34 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ..... - 36 -

| | | |
|---------|--|--------|
| 2.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 36 - |
| 2.2 | ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ..... | - 36 - |
| 2.3 | ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ..... | - 37 - |
| 2.4 | ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ..... | - 38 - |
| 2.5 | ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ..... | - 40 - |
| 2.6 | ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΜΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑ..... | - 41 - |
| 2.7 | ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΕΦΥΡΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ)..... | - 41 - |
| 2.8 | ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ..... | - 42 - |
| 2.9 | ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ..... | - 43 - |
| 2.10 | ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ, ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ..... | - 43 - |
| 2.11 | ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ - ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ..... | - 45 - |
| 2.11.1. | Πυκνωτής Σε Σειρά..... | - 45 - |
| 2.11.2. | Πυκνωτής Παράλληλα..... | - 45 - |
| 2.10.3. | Κύκλωμα LLC..... | - 46 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΩΝ..... - 48 -

| | | |
|-----|--|--------|
| 3.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 48 - |
| 3.2 | ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΗΝΙΩΝ..... | - 48 - |
| 3.3 | ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΠΗΝΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | - 48 - |
| 3.4 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΗΝΙΟΥ..... | - 49 - |
| 3.5 | ΠΗΝΙΑ ΠΟΛΛΩΝ ΣΠΕΙΡΩΝ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ..... | - 51 - |
| 3.6 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΗ..... | - 51 - |
| 3.7 | ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΝΙΟΥ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ..... | - 54 - |
| 3.8 | ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ..... | - 54 - |

| | |
|---|--------|
| 3.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | - 54 - |
| 3.10 ΜΟΡΦΗ ΠΗΝΙΟΥ | - 56 - |
| 3.11 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΩΛΗΝΑ - ΠΗΝΙΟΥ | - 59 - |
| 3.12 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ | - 60 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ..... - 62 -

| | |
|--|--------|
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 62 - |
| 4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΑ | - 62 - |
| 4.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ | - 62 - |
| 4.4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ | - 64 - |
| 4.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΡΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗ | - 64 - |
| 4.6 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ..... | - 65 - |
| 4.7 ΡΕΥΜΑΤΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗ- | 68 - |
| 4.8 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΟΥ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ | - 69 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ..... - 70 -

| | |
|---|--------|
| 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 70 - |
| 5.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ | - 70 - |
| 5.1.1. Συναγωγή..... | - 71 - |
| 5.1.2. Αγωγή | - 72 - |
| 5.1.3. Ακτινοβολία | - 72 - |
| 5.3 ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ..... | - 73 - |
| 5.4 ΕΞΙΣΩΣΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑΣ - ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ..... | - 74 - |
| 5.5 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ | - 75 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - 76 -

| | |
|---------------------------------------|--------|
| 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 76 - |
| 6.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΨΥΞΗΣ | - 80 - |
| 6.2.1. Αντλία κυκλοφορίας νερού | - 81 - |
| 6.2.2. Σωλήνες κυκλοφορίας νερού..... | - 82 - |
| 6.2.3. Ψηφιακό θερμόμετρο | - 83 - |

| | |
|--|---------------|
| 6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ..... | - 84 - |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ | - 86 - |
| 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | - 86 - |
| 7.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ..... | - 86 - |
| 7.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ | - 87 - |
| 7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ | - 93 - |
| 7.4.1 Αποτυχημένες δοκιμές..... | - 93 - |
| 7.4.2 Μελλοντική ανάπτυξη – Βελτίωση συσκευής..... | - 94 - |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | - 97 - |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σχεδίαση, η κατασκευή και η αξιολόγηση μιας συσκευής επαγωγικής θέρμανσης με πηνίο για εφαρμογή σε μεταλλικά δοκίμια. Η Επαγωγική Θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί όπου χρειάζεται να θερμανθεί ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό γρήγορα, καθαρά και με ελεγχόμενο τρόπο. Αξίζει, ακόμη, να σημειωθεί, ότι εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό για τοπική θέρμανση.

Η χρήση μιας επαγωγικής εστίας έχει ως αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη και αποτελεσματική ανάπτυξη της θερμοκρασίας, πράγμα που κάνει την διαδικασία της θέρμανσης ενός δοκιμίου ταχύτερη σε σύγκριση με άλλες συμβατικές μεθόδους. Με τη χρήση ενός πηνίου και την κατάλληλη ηλεκτρική τροφοδότησή του μέσα από ένα συνδυασμό συστημάτων τροφοδοτικού/πλακέτας, καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική θέρμανση ενός υλικού. Το κατάλληλο σύστημα υδρόψυξης είναι το συνεργαζόμενο σύστημα μαζί με τα κατάλληλα θερμομέτρα για την ψύξη αλλά και την καταγραφή των μετρήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής. Ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα της συσκευής είναι το πηνίο, του οποίου στην ουσία τα χαρακτηριστικά (υλικό, σχήμα, μήκος, σπείρες κ.λ.π) καθιστούν δυνατή τη λειτουργία αλλά και την αποτελεσματικότητα της συσκευής.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μια λεπτομερής αναφορά του θεωρητικού υπόβαθρου σε σχέση με την επαγωγική θέρμανση, η οποία είναι σημαντική για την κατανόηση της λειτουργίας της συσκευής. Επίσης, αναλύονται και περιγράφονται όλες οι τεχνικές προδιαγραφές για την επιλογή υλικών και σχεδιασμού κατάλληλου πηνίου της υπό μελέτη διάταξης. Τέλος αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πειραμάτων καθώς και του ενεργειακού ισοζυγίου της συσκευής.

1.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος Επαγωγική Θέρμανση αναφέρεται στην διαδικασία θέρμανσης ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού (συνήθως μέταλλο) χωρίς επαφή. Χρησιμοποιεί υψηλής συχνότητας ηλεκτρισμό και η παραγωγή θερμότητας είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης δινορευμάτων. Επειδή, είναι χωρίς επαφή δεν μολύνει το προς θέρμανση υλικό και αυτό την κάνει συγκρίσιμη με άλλες μεθόδους θέρμανσης όπου η θερμότητα παράγεται μέσω φλόγας. Εξαιτίας και πάλι αυτού του ιδιαίτερου χαρακτηριστικού η θέρμανση χωρίς επαφή, όπως πολλές φορές χαρακτηρίζεται, χρησιμοποιείται στην βιομηχανία σε ειδικές εφαρμογές. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της λειτουργίας της κατασκευής.

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Η Επαγωγική Θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί όπου χρειάζεται να θερμανθεί ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό γρήγορα, καθαρά και με ελεγχόμενο τρόπο. Αξίζει, ακόμη, να σημειωθεί, ότι εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό για τοπική θέρμανση.

Μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι το σφράγισμα με μεταλλικά καπάκια ιατρικών μπουκαλιών και μπουκαλιών αναψυκτικών και ποτών. Ένα αλουμινένιο φύλλο τοποθετείται πάνω από το άνοιγμα του πλαστικού ή του γυάλινου μπουκαλιού και θερμαίνεται γρήγορα καθώς το μπουκάλι περνάει κάτω από το μηχάνημα της Επαγωγικής Θέρμανσης. Η θερμότητα λιώνει το φύλλο και αυτό καλύπτει- βιδώνει πάνω στην κορυφή του μπουκαλιού. Έτσι το καπάκι προστατεύει το περιεχόμενο του μπουκαλιού μέχρι ο καταναλωτής να το ανοίξει.

Μία άλλη κοινή εφαρμογή είναι η απομάκρυνση ρύπων από κενούς σωλήνες όπως ο καθοδικός σωλήνας της τηλεόρασης, σωλήνες υπό πίεση και η απομάκρυνση διαφόρων αερίων από λάμπες εκκένωσης. Ένα δαχτυλίδι από αγώγιμο υλικό τοποθετείται μέσα στο κενό γυάλινο δοχείο (σωλήνας). Επειδή η Επαγωγική Θέρμανση είναι μια διαδικασία χωρίς επαφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει το αγώγιμο δαχτυλίδι, το οποίο είναι ερμητικά κλεισμένο μέσα στον σωλήνα. Ένα πηνίο εργασίας τοποθετείται πολύ κοντά στο αγώγιμο δαχτυλίδι, εξωτερικά του κενού σωλήνα και η AC πηγή ανάβει. Μέσα σε δευτερόλεπτα, το αγώγιμο δαχτυλίδι έχει πυρώσει και τα χημικά στην επιφάνεια του αντιδρούν με οποιαδήποτε αέρια μέσα στον σωλήνα. Το αποτέλεσμα είναι ότι το δαχτυλίδι "ρουφάει" κάθε ίχνος υπολειπόμενου αερίου μέσα στον σωλήνα και έτσι αυξάνει την καθαρότητα του.

Άλλη εφαρμογή είναι η χρήση της Επαγωγικής Θέρμανσης σε μια διαδικασία που ονομάζεται «Zone purification» και χρησιμοποιείται στην βιομηχανία κατά την κατασκευή ημιαγωγών. Κατά την διεργασία αυτή το πυρίτιο καθαρίζεται με την έννοια της μετακίνησης ζώνης από το λιωμένο υλικό.

Τα χαρακτηριστικό της Επαγωγικής Θέρμανσης «χωρίς επαφή» σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέρμανση μετάλλων χωρίς το ρίσκο μόλυνσης του υλικού. Έτσι, μεταλλικά ιατρικά εργαλεία μπορούν να αποστειρωθούν με την θέρμανση τους σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ είναι σε κλειστό, αποστειρωμένο περιβάλλον για να σκοτωθούν οι μικροοργανισμοί.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια κατασκευής «τεχνητών» θερμοπιδάκων. Προσπαθούν ουσιαστικά να επιτύχουν την θέρμανση του νερού (έως 60 °C) σε μεγάλες δεξαμενές μέσω της Επαγωγικής Θέρμανσης και την χρήση του σε οικιακές εφαρμογές.

Κύρια εφαρμογή της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι η επεξεργασία μετάλλων. Η επαγωγική θέρμανση εξασφαλίζει έλεγχο του ποσού θερμότητας που διοχετεύεται στο υλικό που υπόκειται σε θερμική επεξεργασία. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην μεταλλοβιομηχανία. Πολύ υψηλές ταχύτητες θέρμανσης και σχετικά μικροί χρόνοι επεξεργασίας μπορούν να επιτευχθούν επειδή δεν υπάρχει αντίσταση ανάμεσα στην πηγή και το υλικό το οποίο πρόκειται να θερμανθεί, πράγμα που συμβαίνει σε άλλες μεθόδους θέρμανσης. Στην πραγματικότητα, η Επαγωγική Θέρμανση χρησιμοποιείται σε πολλούς κλάδους της επεξεργασίας μετάλλων, κάποιοι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Σφυρηλάτηση
- Σκλήρυνση
- Λιώσιμο (Τήξη)
- Συγκόλληση
- Ανόπτηση
- κ.α.

Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα (παράγραφος 2.2) οι αρχές στις οποίες στηρίζεται η Επαγωγική Θέρμανση δεν είναι λίγες και καθόλου απλές, αντίθετα αρκετά σύνθετες. Έτσι ο ακριβής υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων που απαρτίζουν την Επαγωγική Διάταξη απαιτεί μεγάλη προσπάθεια.

Μέχρι πρόσφατα τα περισσότερα συστήματα Επαγωγικής Θέρμανσης στηρίζονταν σε εμπειρικές μεθόδους και σε τεχνικές δοκιμών. Αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι (κυρίως για τη κατασκευή του πηνίου εργασίας) είναι χρονοβόρες και ακριβές καθώς στηρίζονται στην κατασκευή και τροποποίηση (και πολλές φορές την αλλαγή) των διαφόρων μερών της

Επαγωγικής Διάταξης. Οι διαδικασίες αυτές δεν επιτρέπουν την κατανόηση του τι συμβαίνει μέσα στο πηνίο εργασίας (θερμική προσέγγιση) και δεν παρέχουν καμία ουσιαστική πληροφόρηση για το αν η Επαγωγική διάταξη δουλεύει σωστά ή όχι. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι η «εμπειρία και η τεχνική» μένουν στους κατασκευαστές και δεν μπορούν να μεταλαμπαδευτούν εύκολα.

Σύγχρονη μέθοδος υπολογισμού των μερών της Επαγωγικής Διάταξης αποτελεί η Προσομοίωση με διάφορα υπολογιστικά μοντέλα. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής. Είναι πιο σίγουρη η εύρεση του βέλτιστου πχ πηνίου εργασίας, ενώ ταυτόχρονα ο κατασκευαστής έχει ουσιαστική εικόνα για το συμβαίνει στο εσωτερικό του αντικειμένου προς θέρμανση. Ακόμη, μπορεί να κάνει αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους και να παρατηρήσει τις αλλαγές στο σύνολο της Επαγωγικής Διάταξης.

Αρχικά, απλά υπολογιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για λόγους κατανόησης, τα οποία επιτρέπουν την συσχέτιση των στοιχείων της Επαγωγικής Θέρμανσης. Στην πραγματικότητα τα μοντέλα αυτά είναι πιο σύνθετα. Η επιλογή διαφόρων μοντέλων για την περιγραφή της Επαγωγικής Διάταξης αποτελεί ένα μεγάλο πεδίο ερευνών και δίνει διαφορετικές προσεγγίσεις στα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν την Επαγωγική Θέρμανση.

1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η Επαγωγική Θέρμανση αποτελείται κυρίως από τρεις (3) βασικές αρχές:

- Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή
- Επίδερμικό Φαινόμενο
- Μεταφορά Θερμότητας

Όσο αφορά τον σίδηρο και κάποιους τύπους χάλυβα, υπάρχει ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης γνωστός ως Απώλειες Υστέρησης.

1.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ.

Με τον όρο θερμική κατεργασία ορίζεται μία διεργασία, κατά την οποία το επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα συγκεκριμένο θερμικό κύκλο με τα ακόλουθα στάδια :

- θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή θερμοκρασία
- παραμονή στην εν λόγω θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα

- ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα παραπάνω στάδια αποτελούν το γενικευμένο σχήμα μίας οποιασδήποτε θερμικής κατεργασίας.

Οι βασικές παράμετροι, οι οποίες διαφοροποιούν μεταξύ τους τις θερμικές κατεργασίες, είναι οι ακόλουθες :

- Η θερμοκρασία
- Ο χρόνος παραμονής στην παραπάνω θερμοκρασία
- Ο ρυθμός απόψυξης

Το μέσο ή περιβάλλον θέρμανσης (αέρας, τηγμένα άλατα), το μέσο απόψυξης (νερό, λάδι, αλατόνερο), αλλά και η μάζα του κατεργαζόμενου υλικού, είναι βασικά στοιχεία των θερμικών κατεργασιών, γιατί επηρεάζουν σημαντικά τις βασικές τους παραμέτρους.

1.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

Οι σημαντικότερες οικογένειες θερμικών κατεργασιών χαλύβων είναι οι ακόλουθες :

- Ανόπτηση
- Βαφή
- Επαναφορά

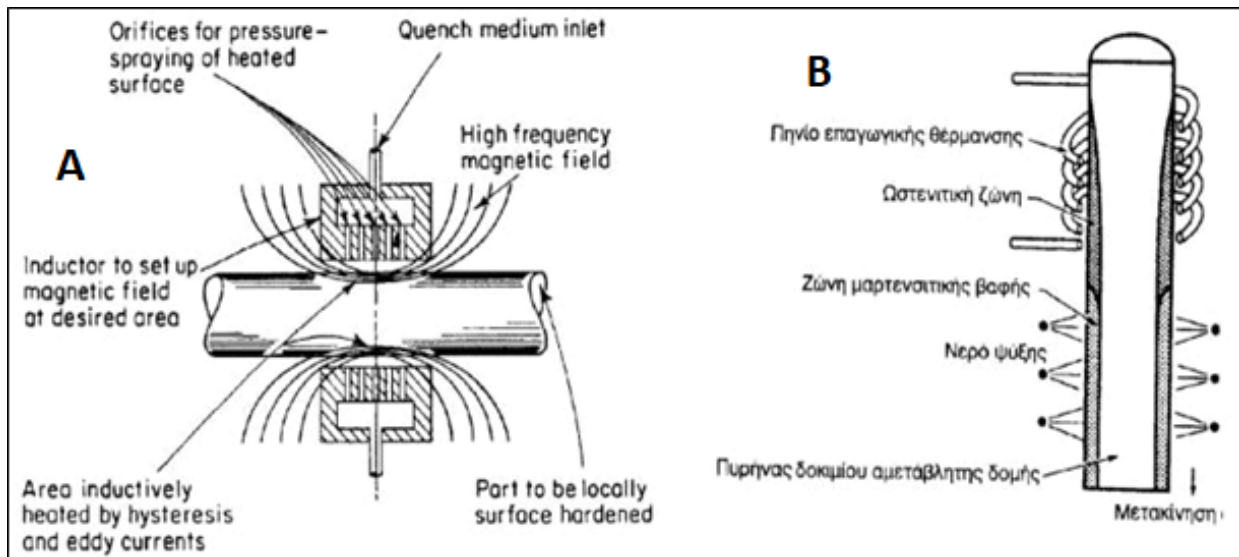
Γενικά, η ανόπτηση, που εφαρμόζεται στους χάλυβες, έχει στόχο τη μείωση της σκληρότητας των εσωτερικών τάσεων, την αύξηση της πλαστικότητας και της κατεργασιμότητας, αλλά και την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης χυτών, κυρίως, τεμαχίων. Η βαφή των χαλύβων έχει στόχο τη σκλήρυνσή τους και η επαναφορά, η οποία εφαρμόζεται μετά από βαφή, έχει στόχο την ανάκτηση της δυσθραυστότητας μέσω μείωσης της σκληρότητας.

1.7 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ

Κατά την επαγωγική σκλήρυνση με υψίσυχνα ρεύματα, το υλικό τοποθετείται κατάλληλα μέσα σε ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί υψίσυχνα επαγωγικά ρεύματα, τα οποία διεισδύουν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του υλικού, θερμαίνοντάς το ταυτόχρονα τοπικά. Η θέρμανση αυτή προκαλεί ωστενιτοποίηση της επιφανειακής στιβάδας του υλικού και κατόπιν

ακολουθεί απότομη ψύξη (βαφή) για τη σκλήρυνση της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη σκλήρυνση εξαρτημάτων απλής γεωμετρίας, ολισθητήρων, εργαλειομηχανών, κ.λπ.

Μπορεί να γίνει μια σημαντική διάκριση ανάμεσα στον τρόπο σκλήρυνσης-θέρμανσης και αφορά το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης. Μπορεί για παράδειγμα να γίνεται σκλήρυνση σε ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση και τότε μιλάμε για επιφανειακή θέρμανση (surface hardening), μπορεί όμως το βάθος διείσδυσης να προχωρά προς το εσωτερικό του αντικειμένου σε βαθύτερα στρώματα, τότε μιλάμε για δια μέσου σκλήρυνση- θέρμανση (through heating). Επιφανειακή σκλήρυνση εφαρμόζεται σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ σε χάλυβες με μεσαία και υψηλά ποσοστά πρόσμιξης άνθρακα εφαρμόζεται δια μέσου θέρμανση. Η διάκριση αυτή γίνεται και θεωρείται αναγκαία διότι παίζει ρόλο στον τρόπο υπολογισμού καθοριστικών παραμέτρων για την Επαγωγική Διάταξη (Εικόνα 1.1), όπως η συχνότητα και το βάθος διείσδυσης.



Εικόνα 1.1 Βασικές αρχές της Επαγωγικής Διάταξης.

A) Γενική διάταξη B) Δράση μαγνητικού πεδίου

1.8 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.

Τα μαγνητικά υλικά είναι μια πολύ σπουδαία κατηγορία βιομηχανικών υλικών που είναι απαραίτητα σε πολλές μηχανολογικές, ηλεκτρικές και κυρίως ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Εξετάζοντας την μαγνητική συμπεριφορά των υλικών μπορούμε να διακρίνουμε δύο γενικές κατηγορίες μαγνητικών φαινομένων. Η πρώτη είναι τα φαινόμενα επαγωγικής

μαγνήτισης (induced magnetism).

Τα υλικά αυτά μαγνητίζονται μόνο όταν βρίσκονται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Απομακρυνόμενα από το μαγνητικό πεδίο δεν παρουσιάζουν μαγνητική συμπεριφορά.

Τα υλικά αυτά ανάλογα με την ιδιαίτερη συμπεριφορά τους στο μαγνητικό πεδίο διακρίνονται σε διαμαγνητικά και παραμαγνητικά (diamagnetic and paramagnetic).

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα φαινόμενα αυθόρμητου μαγνητισμού (spontaneous magnetism). Τα υλικά της κατηγορίας αυτής μαγνητίζονται παρουσία μαγνητικού πεδίου και διατηρούν τη μαγνητική τους συμπεριφορά και απουσίας μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα με την ιδιαίτερη μαγνητική συμπεριφορά τους διακρίνονται σε σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic), αντισιδηρομαγνητικά (antiferromagnetic), και σιδηριμαγνητικά (ferrimagnetic).

1.9 ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επιδράσει στα άτομα του υλικού προκαλεί παραμόρφωση των τροχιών όπου κινούνται τα ηλεκτρόνια. Λόγω της παραμόρφωσης των τροχιακών διαταράσσεται η μαγνητική κατάσταση των ατόμων και δημιουργούνται μαγνητικά δίπολα που αντιστρατεύονται το εξωτερικό πεδίο προκαλώντας αρνητική μαγνήτιση. Η συμπεριφορά αυτή του υλικού καλείται διαμαγνητισμός.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι αρνητική και πολύ μικρή, της τάξεως $\chi = -10^{-6}$.

Όλα τα υλικά εμφανίζουν διαμαγνητική συμπεριφορά. Δεν εμφανίζουν όμως όλα αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα γιατί σε πολλά από αυτά λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και άλλα ισχυρότερα μαγνητικά φαινόμενα που εξουδετερώνουν και εξαφανίζουν τα διαμαγνητικά αποτελέσματα. Τα διαμαγνητικά φαινόμενα εξαφανίζονται με την απομάκρυνση του υλικού από το μαγνητικό πεδίο. Ο διαμαγνητισμός δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία. Δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον.

1.10 ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εμφανίζουν μικρή θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Παραμαγνητισμό εμφανίζουν τα υλικά που περιέχουν στη δομή τους άτομα με ασύζευκτα ηλεκτρόνια.

Η παραμαγνητική συμπεριφορά των υλικών αυτών οφείλεται στον προσανατολισμό των μαγνητικών διπολικών ροπών των ατόμων ή μορίων τους παράλληλα προς το εξωτερικό πεδίο.

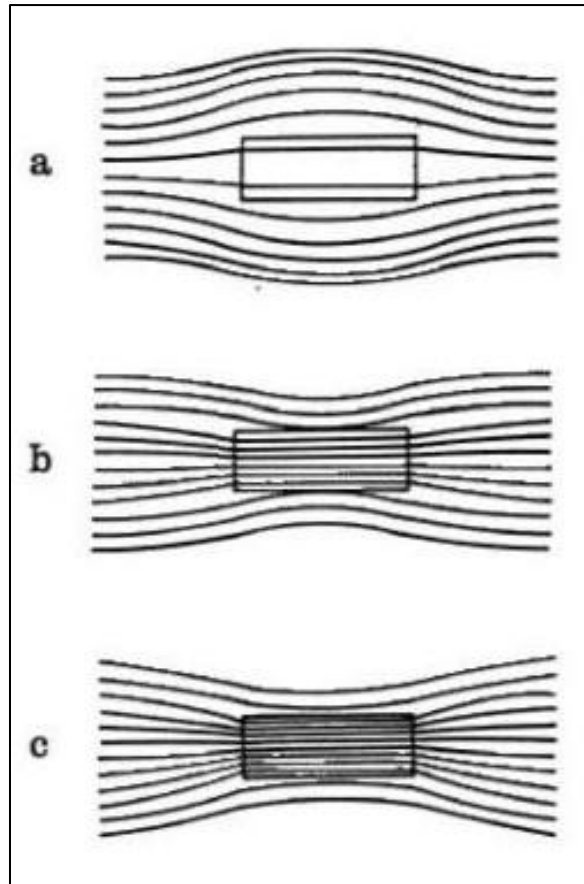
Απουσία πεδίου τα μαγνητικά δίπολα του υλικού έχουν τυχαίες διευθύνσεις που επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Υπό την επίδραση πεδίου τα δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο. Ο τέλειος προσανατολισμός δεν είναι πρακτικά εφικτός γιατί απαιτείται πρακτικά απείρως μεγάλη ένταση πεδίου λόγω ενεργειακής αλληλεπίδρασης μεταξύ των διπόλων.

Ο παραμαγνητισμός είναι αντιστρεπτός (δηλαδή εμφανίζεται απουσία εξωτερικού πεδίου) και εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού ευνοεί την άτακτη διευθέτηση των μαγνητικών διπόλων του με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραμαγνητική συμπεριφορά του.

Επίσης οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τα παραμαγνητικά φαινόμενα. Οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας στα παραμαγνητικά υλικά κυμαίνονται από $10^{-6} \div 10^{-2}$. Τυπικά υλικά που εμφανίζουν έντονα παραμαγνητισμό είναι τα αλκαλιμέταλλα, μερικά μεταβατικά μέταλλα και μέταλλα των σπανίων γαιών, το οξυγόνο κλπ.

1.11 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Σιδηρομαγνητισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αποκτούν μεγάλη μαγνήτιση μέρος της οποίας διατηρούν μετά την απομάκρυνση του πεδίου με βάση τις δυναμικές γραμμές μαγνητικής επαγωγής (Εικόνα 1.2). Τα υλικά αυτά που διατηρούν μόνιμη μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου ονομάζονται σιδηρομαγνητικά. Τα κυριότερα σιδηρομαγνητικά στοιχεία από τεχνολογική πλευρά είναι τα μεταβατικά μέταλλα σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο. Επίσης από τις σπάνιες γαίες το γαδολίνιο κάτω από 16°C .



Εικόνα 1.2 Δυναμικές γραμμές μαγνητικής επαγωγής σε διαμαγνητικό (a), παραμαγνητικό (b) και σιδηρομαγνητικό (c) υλικό.

Ο σιδηρομαγνητισμός των μεταβατικών μετάλλων αποδίδεται στον αυθόρμητο προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών γειτονικών ατόμων. Το φαινόμενο ονομάζεται αυθόρμητη μαγνήτιση.

Η αυθόρμητη μαγνήτιση συμβαίνει σε ομάδες γειτονικών ατόμων που αποτελούν τις μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές του υλικού. Όταν οι μαγνητικές περιοχές έχουν τυχαίους προσανατολισμούς το υλικό δεν εμφανίζει μαγνητισμό. Η αυθόρμητη μαγνήτιση αποδίδεται στις αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων γειτονικών ατόμων που ονομάζονται αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι κβαντομηχανικού χαρακτήρα και η εξήγησή τους απαιτεί ειδικές γνώσεις κβαντομηχανικής. Με απλούς όρους οι αλληλεπιδράσεις των γειτονικών ατόμων έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενέργειας μεταξύ τους, γνωστής ως ενέργειας ανταλλαγής.

1.12 ΑΡΧΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Όταν στο σωληνοειδές τοποθετηθεί πυρήνας από μαγνητιζόμενο υλικό το πεδίο έξω από το σωληνοειδές θα είναι ισχυρότερο λόγω του πρόσθετου μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνητικός πυρήνας του σωληνοειδούς. Η επαγωγή θα δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu \times H = \mu_0 \times H + \mu_0 \times M \text{ (Tesla)} \quad (1.1)$$

Όπου:

μ : η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού στο μαγνητικό πεδίο

M : η μαγνητισση του υλικού που εκφράζει την αύξηση της μαγνητικής ροής που επάγεται ανά μονάδα όγκου του υλικού (A/m)

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά στις περισσότερες περιπτώσεις η ποσότητα μ είναι πολύ μεγαλύτερη της μ_0 , οπότε για τα υλικά αυτά συχνά χρησιμοποιείται η σχέση:

$$B = \mu_0 \times M \quad (1.2)$$

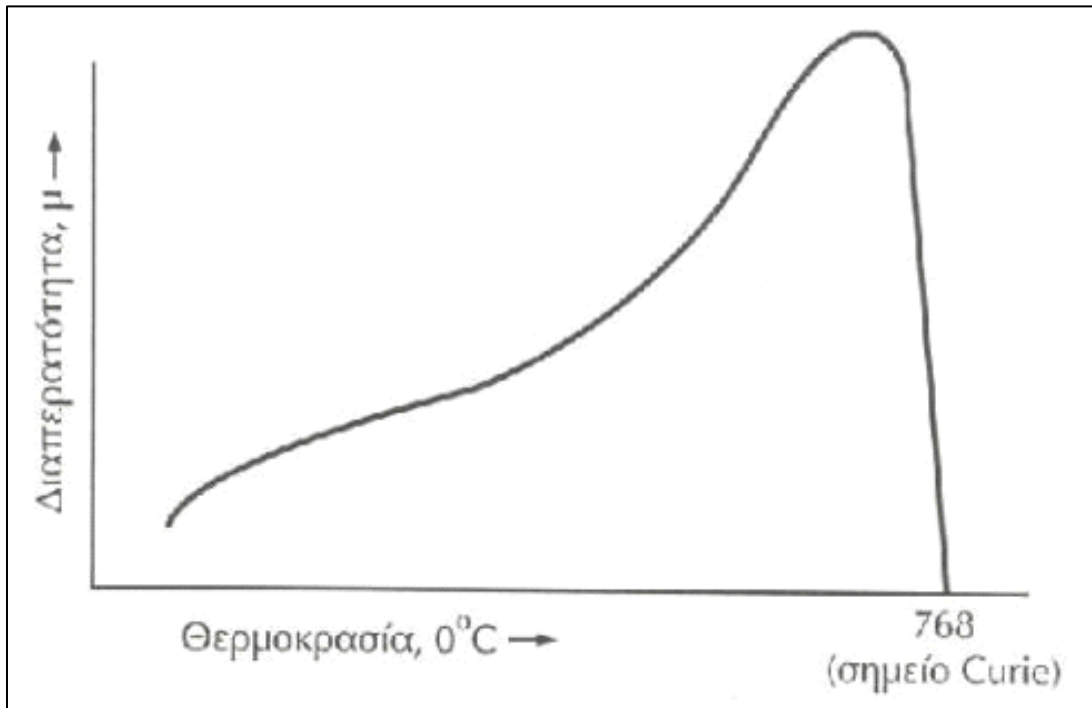
1.13 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.

Για μέταλλα όπως σίδηρο και κάποιους τύπους χάλυβα, υπάρχει ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης γνωστός ως Απώλειες Υστέρησης. Το έντονο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα στο πηνίο εργασίας κατ' επανάληψη μαγνητίζει και απομαγνητίζει τους «κρυστάλλους» σιδήρου ή άλλου σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυτή η αναστροφή - στρίψιμο των μαγνητικών περιοχών προκαλεί σημαντική τριβή και θέρμανση μέσα στο υλικό. Η θέρμανση εξαιτίας αυτού του μηχανισμού είναι γνωστή ως Απώλειες Υστέρησης, και είναι μεγαλύτερη για τα υλικά που έχουν μεγάλο εύρος μέσα στην καμπύλη B-H. Οι Απώλειες Υστέρησης μπορούν να είναι ένας προσοδοφόρος παράγοντας στην παραγωγή θερμότητας κατά την διάρκεια της επαγωγικής θέρμανσης, αλλά εμφανίζεται μόνο στα σιδηρομαγνητικά υλικά.

Για το λόγο αυτό τα σιδηρομαγνητικά υλικά επιλέγονται με μικρή αντίσταση και μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, ενώ τα μη-σιδηρομαγνητικά υλικά επιλέγονται με μεγάλη αντίσταση και μικρή μαγνητική διαπερατότητα (αναγκαστικά).

1.14 ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ M - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ T

Η θερμοκρασία Curie πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χρήση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Για παράδειγμα τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μοτέρ, γεννήτριες, μετασχηματιστές, ρυθμιστές και ως μόνιμοι μαγνήτες πρέπει να έχουν θερμοκρασία Curie, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.3, σημαντικά μεγαλύτερη της θερμοκρασίας χρησιμοποίησής τους ώστε να αποφεύγεται η απώλεια της μαγνητικής τους συμπεριφοράς.



Εικόνα 1.3 Καμπύλη μαγνήτισης M-Θερμοκρασίας T

Τα κράματα νικελίου και σιδήρου που χρησιμοποιούνται σε σωλήνες καθοδικών ακτινών, σε φασματογράφους μάζας, σε πυξίδες κλπ δεν πρέπει να εμφανίζουν μαγνητική συμπεριφορά. Συνεπώς η θερμοκρασία Curie των κραμάτων αυτών πρέπει να είναι μικρότερη της θερμοκρασίας χρησιμοποίησής τους.

Η θερμοκρασία Curie ενός υλικού ρυθμίζεται με κατάλληλη κραματοποίηση των σιδηρομαγνητικών στοιχείων. Σχηματίζονται κράματα μεταξύ σιδηρομαγνητικών στοιχείων ή μεταξύ σιδηρομαγνητικών και μη μαγνητικών στοιχείων.

Η μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών με την θερμοκρασία χρησιμοποιείται συχνά σε συσκευές ρύθμισης θερμοκρασίας και σε άλλες εφαρμογές. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και λαμβάνει τη

μέγιστη τιμή της κοντά στη θερμοκρασία Curie. Στη θερμοκρασία αυτή μηδενίζεται απότομα.

Αντισιδηρομαγνητισμός: Όπως και στο σιδηρομαγνητισμό η ιδανική διευθέτηση των διπόλων εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τη θερμική τους κίνηση με αποτέλεσμα να έχουμε αποκλίσεις από την ιδανική αντιαπαράλληλη διευθέτηση των μαγνητικών ροπών τους. Υπάρχει μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel, πάνω από την οποία η αντιαπαράλληλη διευθέτηση των μαγνητικών ροπών εξαφανίζεται πλήρως και το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό. Για το *Cr* και το *Mn* η θερμοκρασία Neel είναι 1673 °C και 95 °C αντίστοιχα.

Σιδηριμαγνητισμός: Τα σιδηριμαγνητικά υλικά πάνω από μια χαρακτηριστική θερμοκρασία (θερμοκρασία Neel) συμπεριφέρονται σαν παραμαγνητικά.

Παραμαγνητισμός: Η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της χ με την θερμοκρασία περιγράφεται από τη σχέση:

$$\chi = \frac{c}{T} \quad (1.3)$$

Όπου:

c: σταθερά

T: θερμοκρασία (K)

Για τα υλικά που εμφανίζουν παραμαγνητισμό πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία Curie (ή Neel) η μεταβολή της μαγνητικής τους επιδεκτικότητας στην παραμαγνητική περιοχή δίνεται από την σχέση:

$$\chi = \frac{c}{(T-T_c)} \quad \text{ή} \quad \chi = \frac{c}{(T-T_N)} \quad (1.4)$$

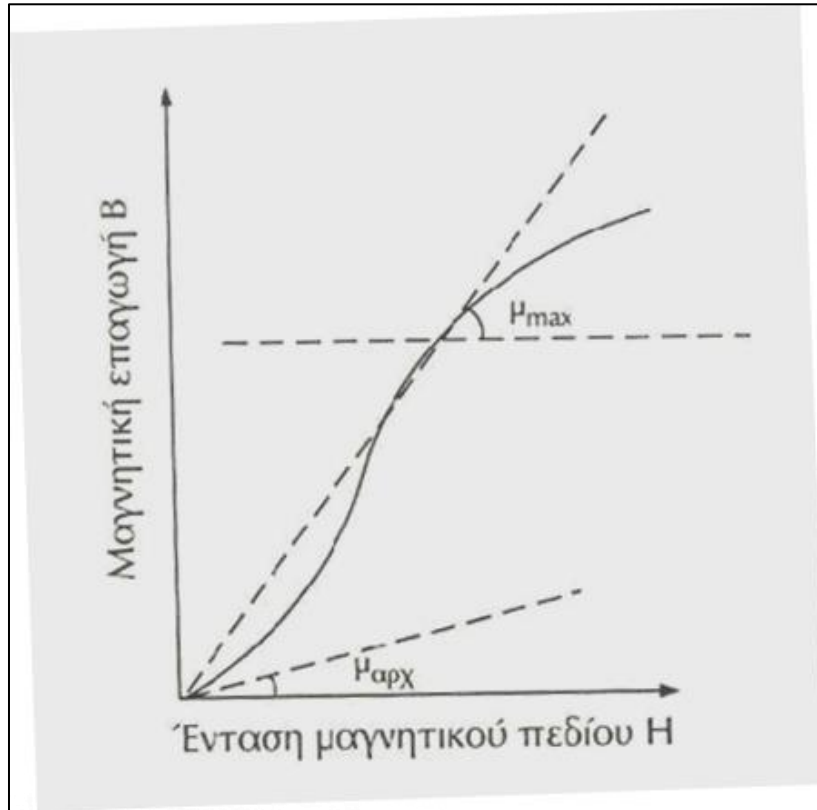
Όπου:

T_c ή T_N : η θερμοκρασία Curie ή Neel (K)

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος *Curie-Weiss*. Απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά που περιγράφει η σχέση παρατηρείται σε πολλά σιδηριμαγνητικά υλικά.

1.15 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (MAGNETIC PERMEABILITY)

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού ορίζεται από την σχέση (1.1) ως ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του πεδίου (Εικόνα 1.4):



Εικόνα 1.4 Καμπύλη Μαγνήτισης Σιδηρομαγνητικού Υλικού

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{1.5}$$

Είναι φανερό ότι όταν οι μαγνητικές ροπές των διπόλων του υλικού ενισχύουν το πεδίο που εφαρμόζεται, $\mu > \mu_0$, ενώ όταν αντιτίθεται στο πεδίο, $\mu < \mu_0$. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό περιγράφεται από τη σχετική διαπερατότητα μ_r (relative permeability).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{1.6}$$

$$\text{Οπότε: } B = \mu_0 \times \mu_r \times H \quad (1.7)$$

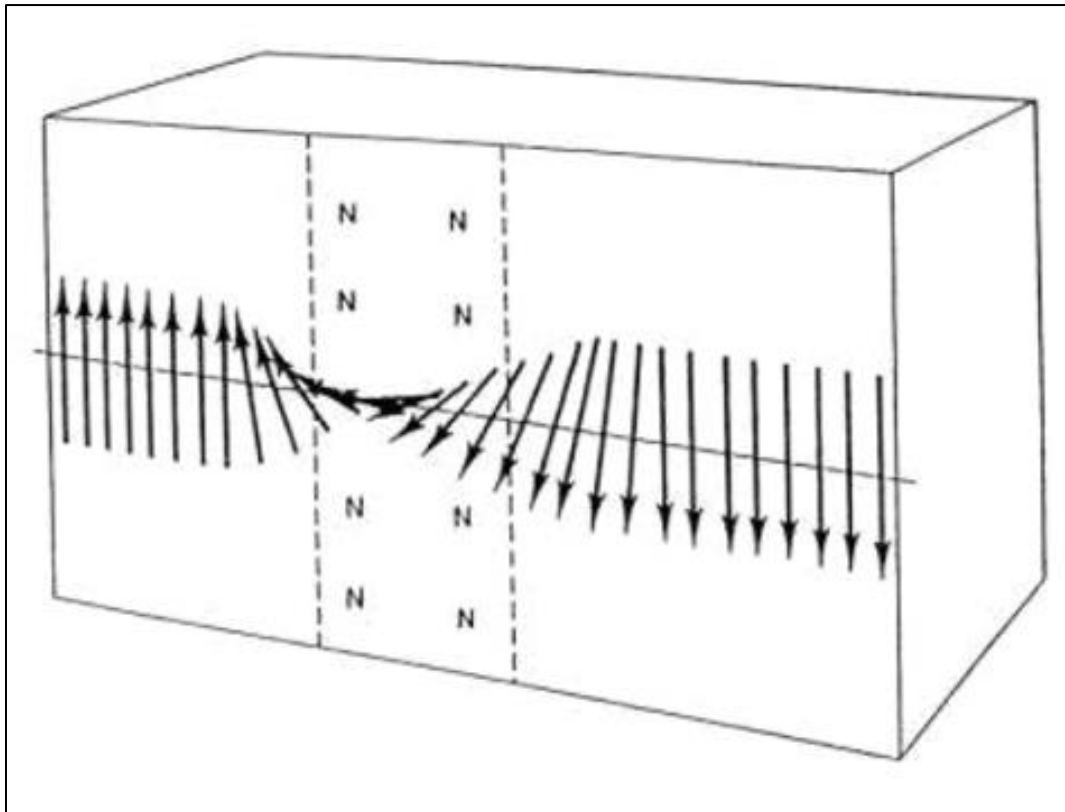
Η σχετική διαπερατότητα μ_r είναι αδιάστατη ποσότητα. Αποτελεί ένα μέτρο της έντασης του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου και θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ανάλογη ποσότητα της διηλεκτρικής σταθεράς των διηλεκτρικών υλικών. Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται καθώς το υλικό μαγνητίζεται.

1.16 ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ (DOMAIN THEORY).

Η θεωρία αυτή διατυπώθηκε από τον P. Weiss το 1907. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά σε θερμοκρασία της θερμοκρασίας Curie αποτελούνται από μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές. Σε κάθε περιοχή οι μαγνητικές ροπές των ατόμων τους είναι παράλληλα διευθετημένες. Οι περιοχές αυτές δημιουργούνται αυθόρμητα μέσα στους κρυσταλλικούς κόκκους του υλικού, χωρίς να είναι απαραίτητη η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που δεν έχει εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών στις στοιχειώδεις μαγνητικές περιοχές του είναι τυχαίος με αποτέλεσμα να μην εμφανίζει μαγνητική ροπή.

Κάθε «μαγνητική περιοχή» του υλικού χωρίζεται από τις γειτονικές της με στιβάδα ατόμων που ονομάζεται «τοίχωμα» της μαγνητικής περιοχής. Ο προσανατολισμός των ατομικών μαγνητικών ροπών (Εικόνα 1.5) στο τοίχωμα μεταξύ δυο γειτονικών περιοχών μεταβάλλεται βαθμιαία από τον προσανατολισμό της μιας περιοχής προς τον προσανατολισμό της άλλης.



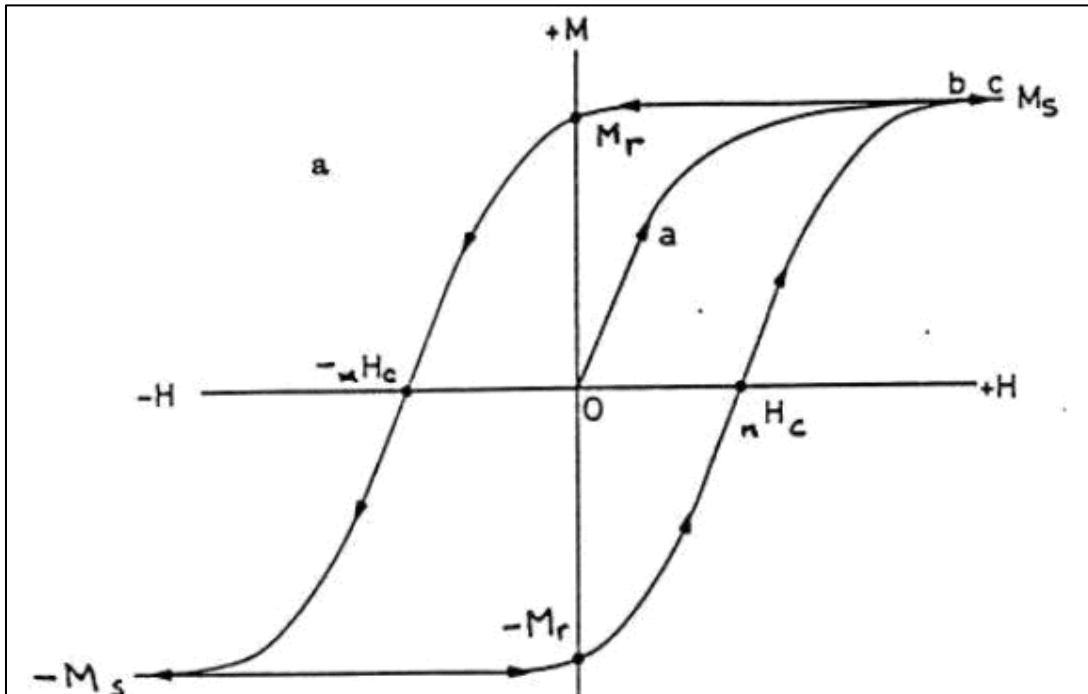
Εικόνα 1.5 Μεταβολή της διεύθυνσης των ατομικών μαγνητικών ροπών στο «τοίχωμα» μεταξύ δύο γειτονικών «μαγνητικών περιοχών»

1.17 ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ - ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Όταν ένα μη μαγνητισμένο υλικό υφίσταται την επίδραση του μαγνητικού πεδίου με βαθμιαία αυξανόμενη ένταση, η μαγνήτιση \mathbf{M} του υλικού αυξάνει από το μηδέν κατά το μήκος της καμπύλης OMs. Η μέγιστη τιμή $+M_s$ που λαμβάνει ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού.

Ελαττώνοντας την ένταση του πεδίου H η μεταβολή της μαγνήτισης δεν ακολουθεί την αρχική καμπύλη OMs αλλά την $M_s M_r$. Στο σημείο M_r όπου η H είναι μηδέν, η μαγνήτιση δεν μηδενίζεται αλλά παραμένει ποσότητα M_r στο υλικό γνωστή ως παραμένουσα μαγνήτιση (remanent magnetization).

Αν το μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί τώρα κατά την αρνητική διεύθυνση η καμπύλη μαγνήτισης ακολουθεί τη γραμμή $M_r - H_c$. Στο σημείο H_c η μαγνήτιση μηδενίζεται. Η ένταση του πεδίου απομαγνήτισης έχει αρνητική τιμή H_c και ονομάζεται απομαγνητίζουσα δύναμη. Η παραμένουσα αύξηση του μαγνητικού πεδίου προς την αρνητική διεύθυνση οδηγεί στη μέγιστη αρνητική μαγνήτιση κορεσμού $-M_s$.



Εικόνα 1.4 Καμπύλη μαγνήτισης – Βρόχος υστέρησης των μαγνητικών υλικών

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως παραπάνω παίρνουμε την καμπύλη $M_s - M_r H_c M_s$ (Εικόνα 1.6) και ο κύκλος μαγνήτισης- απομαγνήτισης είναι πλήρης. Η περιοχή που ορίζεται από την καμπύλη $M_s M_r - H_c - M_s - M_r H_c$ ονομάζεται βρόχος υστέρησης. Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι ισοδύναμο με την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα όγκου του υλικού σε κάθε πλήρη κύκλο μαγνήτισης- απομαγνήτισης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης αλλά και οι αντίστοιχες απώλειες.

1.18 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ (EDDY CURRENT LOSSES).

Όταν το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται σε ένα μαγνητικό υλικό, μεταβάλλεται με πεπερασμένη ταχύτητα, η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής δημιουργεί διαφορές δυναμικού στο υλικό. Αν το υλικό είναι αγώγιμο οι επαγόμενες διαφορές δυναμικού παράγουν ηλεκτρικά ρεύματα που ονομάζονται δινορεύματα (Eddy currents). Τα δινορεύματα αποτελούν την αιτία των απωλειών που εκδηλώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Αν το υλικό είναι μονωτής όπως τα σιδηριμαγνητικά υλικά δεν έχουμε δημιουργία δινορευμάτων και φυσικά απώλειες.

Εφόσον οι διαφορές δυναμικού που επάγονται στο υλικό εξαρτώνται από τη συχνότητα

μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής, οι απώλειες λόγω δινορευμάτων θα εξαρτώνται από τη συχνότητα μεταβολής του πεδίου. Επίσης θα εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του υλικού και το πάχος του υλικού. Η κύρια επίπτωση των δινορευμάτων συνοψίζεται στο ότι απαιτείται μεγαλύτερη ένταση πεδίου H για να επιτύχουμε την ίδια μαγνητική επαγωγή με αυτή που επιτυγχάνεται με μικρότερη H απουσία δινορευμάτων. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεγέθυνση του βρόχου υστέρησης. Συνεπώς σε χαμηλές συχνότητες εναλλαγής μαγνητικού πεδίου ο βρόγχος υστέρησης υλικού έχει ένα ελάχιστο μέγεθος που εξαρτάται κυρίως από τη δομή του υλικού (ατέλειες, προσμίξεις κλπ) ενώ σε υψηλές συχνότητες ο βρόγχος υστέρησης μεγαλώνει λόγω της ανάπτυξης πιο σημαντικών δινορευμάτων. Όταν ένα μαγνητικό υλικό υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο οι απώλειες του είναι το άθροισμα των απωλειών λόγω μαγνητικής υστέρησης και δινορευμάτων.

1.19 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ FARADAY - ΤΑΣΗ ΕΞ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.

Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday, αν μέσα από μία σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται μία τάση e_{ind} που είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο.

$$e_{ind} = -d\phi/dt \quad (1.8)$$

Όπου

e_{ind} : η τάση που επάγεται στα άκρα της σπείρας (V).

ϕ : η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από αυτήν.

Αν ένα πηνίο αποτελείται από N σπείρες κι αν η ίδια μαγνητική ροή περνάει από κάθε σπείρα του, η τάση που επάγεται στα άκρα του θα είναι:

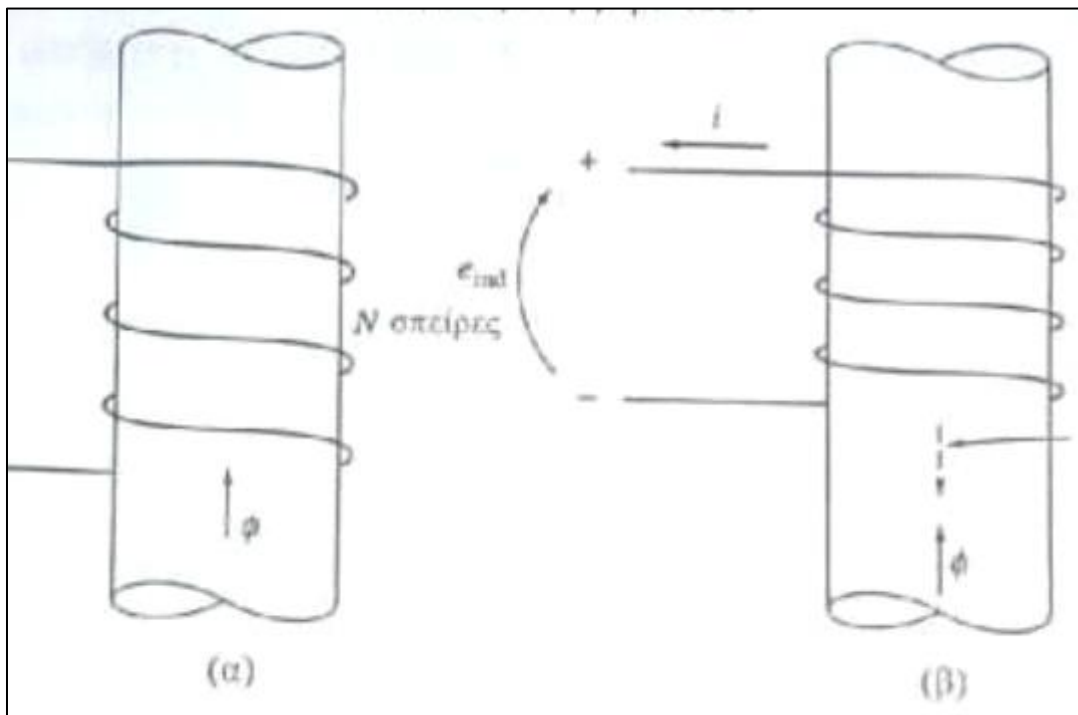
$$e_{ind} = -N(d\phi/dt) \quad (1.9)$$

Όπου

N : ο αριθμός των σπειρών του πηνίου.

Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις οφείλεται στο νόμο του Lenz όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 1.7. Σύμφωνα με αυτό το νόμο η πολικότητα της τάσης που

αναπτύσσεται είναι τέτοια, ώστε, αν τα άκρα του πηνίου βραχυκυκλωθούν, το παραγόμενο ρεύμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που αντιτίθεται στη μεταβολή της αρχικής ροής. Η εικόνα παρακάτω βοηθά στην καλύτερη κατανόηση αυτής της αρχής. Αν η τιμή της μαγνητικής ροής του σχήματος αυξάνεται, τότε η διαφορά δυναμικού που επάγεται στο τυλίγμα τείνει να δημιουργήσει ένα πεδίο με ροή που αντιτίθεται στην αύξηση της αρχικής ροής. Στην εικόνα παρακάτω, η φορά του ρεύματος θα προκαλέσει μαγνητική ροή αντίθετη της αρχικής ή με άλλα λόγια η τάση εξ επαγωγής πρέπει να έχει πολικότητα η οποία να επιβάλλει ένα τέτοιο ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα του πηνίου. Το αρνητικό πρόσημο στις εξισώσεις (1.8) και (1.9) συχνά παραλείπεται αφού προκύπτει από κάποιες φυσικές παρατηρήσεις.



Εικόνα 1.7 Ο νόμος του Lenz

- α) Αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του τυλίγματος.
- β) Προσδιορισμός της πολικότητας της τάσης στα άκρα του τυλίγματος.

Κατά την χρήση της εξίσωσης (1.9) σε πρακτικά προβλήματα προκύπτει μια σημαντική δυσκολία. Σε αυτή την εξίσωση γίνεται η υπόθεση ότι η ροή είναι η ίδια για όλες τις σπείρες του τυλίγματος. Όμως, στην πραγματικότητα ένα μέρος της μαγνητικής ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Όταν οι σπείρες είναι πολύ κοντά η μια με την άλλη, τότε πράγματι, από όλες τους διέρχεται η ίδια μαγνητική ροή και η εξίσωση (1.9) δίνει σωστά αποτελέσματα. Όμως, αν η ροή διαρροής είναι αρκετά μεγάλη ή αν στους υπολογισμούς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια άλλη εξίσωση

στην οποία δεν γίνεται η παραπάνω υπόθεση.

1.20 ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ (SKIN EFFECT).

Επιδερμικό Φαινόμενο ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα δεν διανέμεται ομοιόμορφα μέσα σε ένα αγωγό. Το μεγαλύτερο μέρος της πυκνότητας του ρεύματος συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του αγωγού και μειώνεται όσο κινούμεθα προς το κέντρο. Με άλλα λόγια το ρεύμα ρέει κυρίως στην επιφάνεια του αγωγού. Το επιδερμικό φαινόμενο προκαλεί αύξηση της αντίστασης του αγωγού καθώς η συχνότητα αυξάνεται, επειδή το βάθος διείσδυσης (skin depth) είναι μικρότερο και επομένως μειώνεται η ενεργή διατομή του αγωγού.

1.21 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.

Η αγωγιμότητα του μεταλλικού αγωγού δίδεται από την σχέση:

$$\sigma = \frac{(net)}{m} \quad (1.10)$$

Όπου:

e: σταθερά.

n: ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου.

m: μάζα του ηλεκτρονίου.

t: ο χρόνος ηρεμίας των ηλεκτρονίων.

Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταλλικού αγωγού με τη θερμοκρασία οφείλεται στη μεταβολή του χρόνου ηρεμίας τ αφού τα άλλα μεγέθη e , m , n που υπεισέρχονται στη σχέση δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία μεταλλικού αγωγού, η θερμική ενέργεια προκαλεί αύξηση του εύρους δόνησης των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων (δηλαδή η μέση απόσταση που διανύουν μεταξύ των συγκρούσεων) και ο χρόνος ηρεμίας τ . Συνεπώς η αγωγιμότητα των μετάλλων ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αποδεικνύεται ότι η ειδική αντίσταση των μετάλλων μεταβάλλεται γραμμικά με την απόλυτη θερμοκρασία.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \alpha \left(\frac{1}{T} \right) (\Omega m^{-1}) \quad (1.11)$$

Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν τη γραμμική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης (ή της αγωγιμότητας) από την απόλυτη θερμοκρασία για μεγάλες περιοχές θερμοκρασίας. Αποκλίσεις από την γραμμικότητα παρατηρούνται κοντά στο απόλυτο μηδέν και στη θερμοκρασία τήξεως του υλικού. Σε εφαρμογές για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\rho_{\theta} = \rho_0(1 + \alpha\theta) (\Omega/m) \quad (1.12)$$

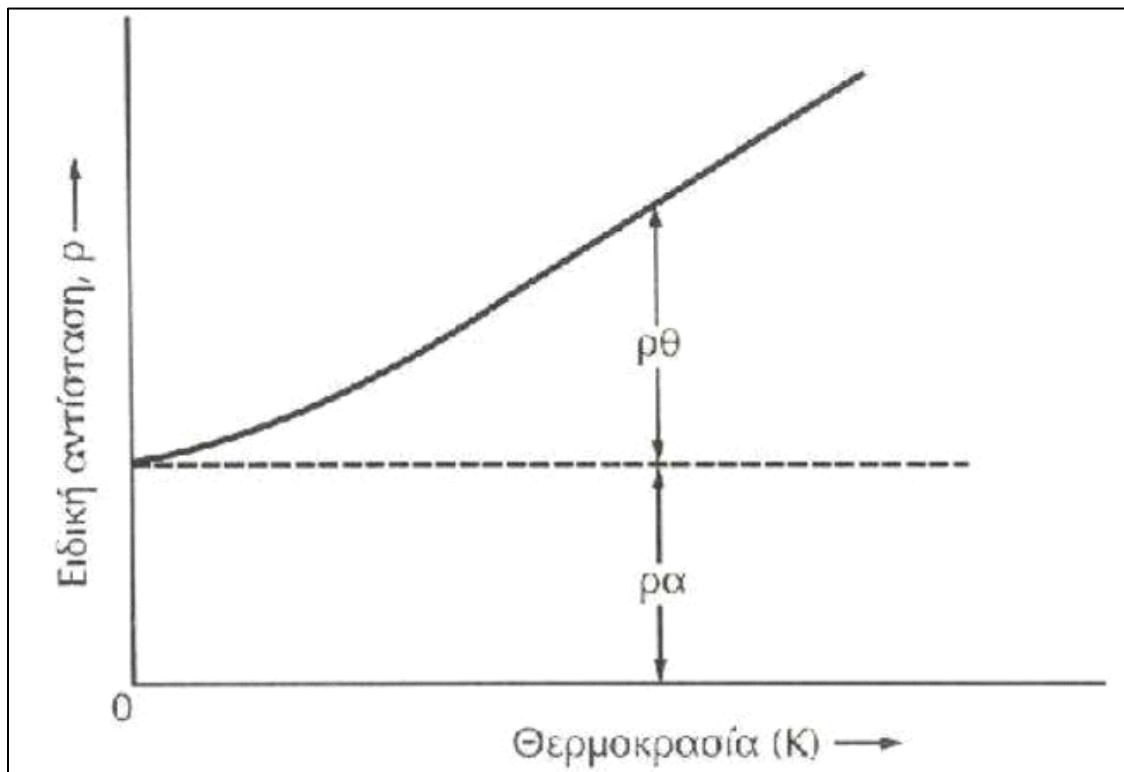
Όπου:

ρ_{θ} : η ειδική αντίσταση του υλικού στους $\theta^{\circ}\text{C}$.

ρ_0 : η ειδική αντίσταση του υλικού στους 0°C (Ω/m).

θ : η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$).

α : θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης $^{\circ}\text{C}^{-1}$.



Εικόνα 1.8 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης με την θερμοκρασία

Οι μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες δείχνουν ότι η ειδική αντίσταση (Εικόνα 1.8) των περισσότερων μετάλλων λαμβάνει μια οριακή τιμή μεγαλύτερη του μηδενός. Κοντά στο απόλυτο μηδέν το εύρος δόνησης των ατόμων του πλέγματος μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα η κίνηση των ηλεκτρονίων να μην επηρεάζεται από τα δονούμενα άτομα. Η παραμένουσα αντίσταση του υλικού οφείλεται στις ατέλειες της κρυσταλλικής δομής.

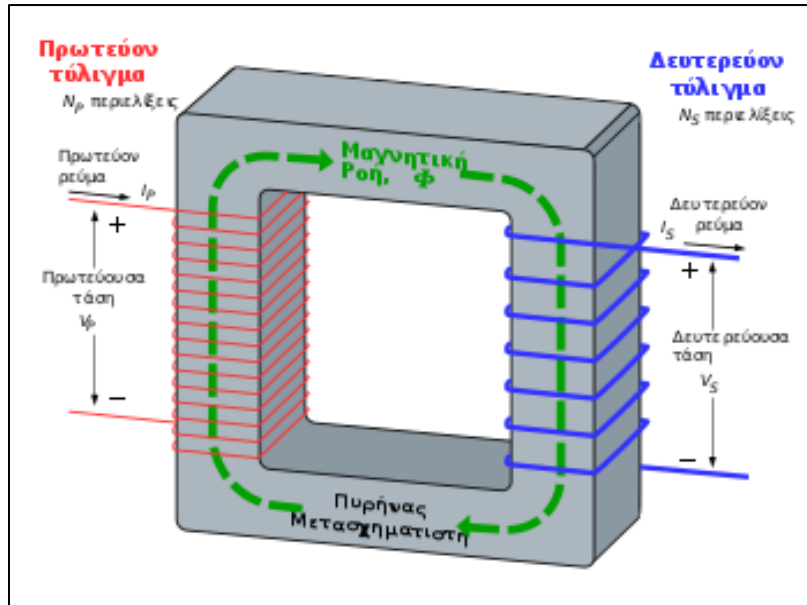
Οι ατέλειες θεωρούνται ότι δημιουργούν ενεργειακά φράγματα που παρεμποδίζουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων. Η ειδική αντίσταση ενός μετάλλου θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες:

$$\rho = \rho_a + \rho_r \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (1.13)$$

Η ρ_a αποδίδεται στις ατέλειες της δομής και είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, ενώ η ρ_r αποδίδεται στη θερμοκρασία και οφείλεται στις συγκρούσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων και των δονούμενων ατόμων.

1.22 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος. Στην εικόνα 1.9 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μετασχηματιστή.

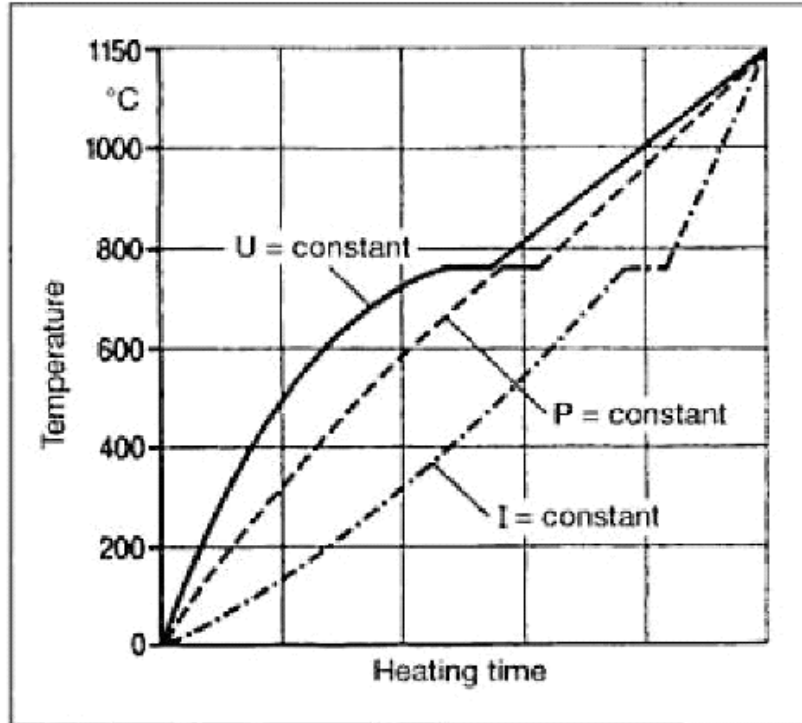


Εικόνα 1.9 Ένας ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του

Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα.

1.23 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΣ ΡΕΥΜΑ

Όταν χρησιμοποιούμε DC, η θερμότητα διανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την διατομή του αγωγού. Βασικά, θέρμανση μπορεί να προκύψει με συνεχές ρεύμα, συνεχή τάση και συνεχή ισχύ. Όταν χρησιμοποιείται συνεχή ρεύμα, η θερμοκρασία θα αυξηθεί αργά στην αρχή (εικόνα 1.10), επειδή η αγωγιμότητα είναι μεγάλη και επομένως η ηλεκτρική αντίσταση είναι μικρή στο αρχικό στάδιο. Όταν χρησιμοποιείται συνεχή τάση, η θερμοκρασία θα αυξηθεί γρήγορα στην αρχή, επειδή η ηλεκτρική αντίσταση είναι μικρή για χαμηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 1.10 Απαιτούμενος χρόνος θέρμανσης κατά την θέρμανση με συνεχή τάση, συνεχή ρεύμα, συνεχή ισχύ

Όταν χρησιμοποιείται συνεχή ισχύ, πρέπει το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος να είναι ίσο καθ' όλη την διάρκεια της θέρμανσης, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας είναι σχεδόν γραμμική, με εξαίρεση το σημείο μετάβασης. Στο εύρος χαμηλών θερμοκρασιών η θερμοκρασία είναι η ίδια σε όλη την διατομή του αγωγού, με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον πυρήνα είναι υψηλότερες από αυτές που επικρατούν στην επιφάνεια του αγωγού, εξαιτίας των επιφανειακών απωλειών.

1.24 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ.

Κατά την θέρμανση με εναλλασσόμενο ρεύμα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο. Η κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού που θερμαίνεται, την διατομή του και τον ρυθμό θέρμανσης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη στην επιφάνεια του υλικού και μεταφέρεται προς τον πυρήνα του μέσω της αγωγής. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι ακόμη μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται η αναλογία a/δ (διάμετρος αντικείμενου προς θέρμανση/ βάθος διείσδυσης) και με γρηγορότερη θέρμανση. Στην θερμοκρασία Curie, η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού και του πυρήνα συγκλίνουν, όταν η αναλογία a/δ είναι μικρή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

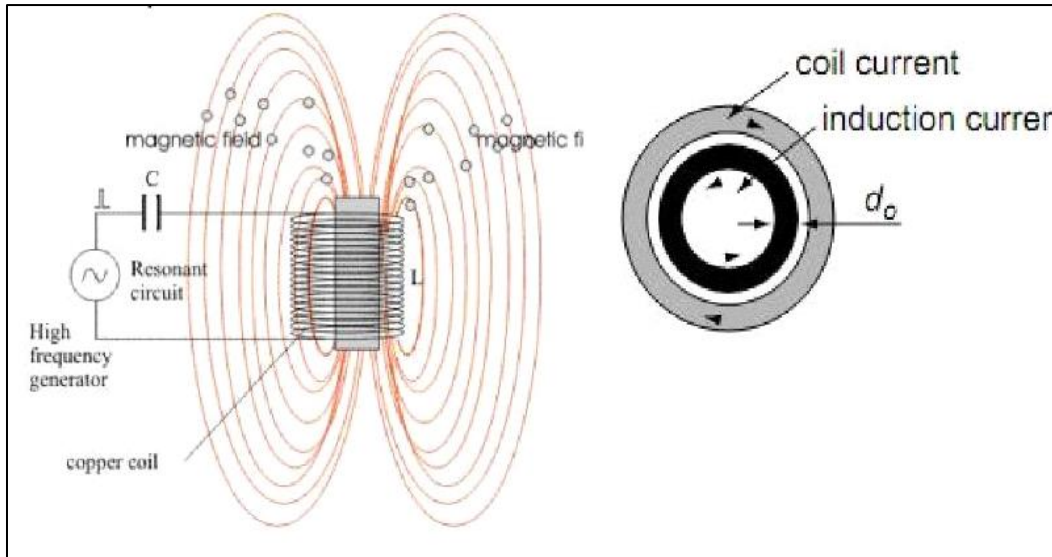
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν τα κυριότερα τμήματα που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία μιας συσκευής επαγωγικής θέρμανσης. Η συσκευή για να λειτουργήσει απαρτίζεται κυρίως από τα ηλεκτρικά συστήματα όπως η πλακέτα, το πηνίο, το τροφοδοτικό καθώς και από το σύστημα ψύξης το οποίο αποτελούν τα σωληνάκια, η δεξαμενή του νερού, η αντλία κ.λ.π.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η Επαγωγική Θέρμανση αποτελείται κυρίως από τρεις (3) βασικές αρχές:

- Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή
- Επίδερμικό Φαινόμενο
- Μεταφορά Θερμότητας

Όσον αφορά τον σίδηρο και κάποιους τύπους χάλυβα, υπάρχει ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης γνωστός ως Απώλειες Υστέρησης. Αναφορά σε αυτό το μηχανισμό γίνεται και στην παράγραφο που ακολουθεί.



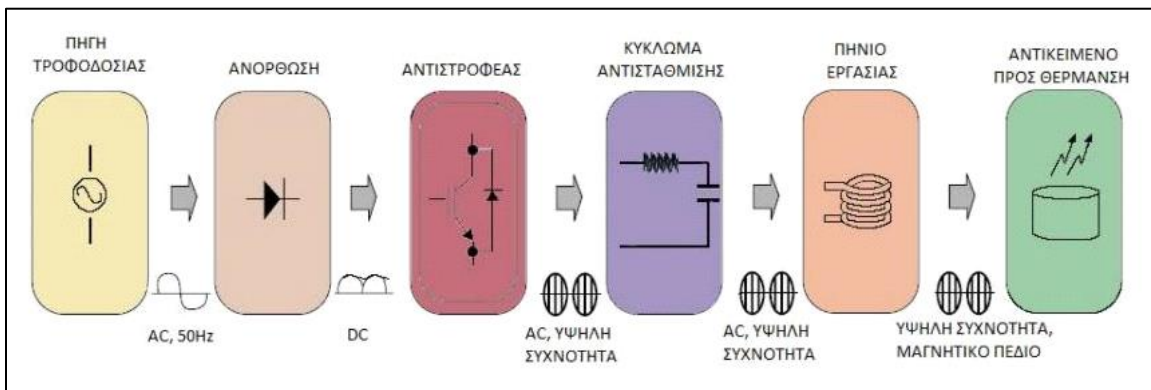
Εικόνα 2.1 Μεταβαλλόμενο Μαγνητικό πεδίο (αριστερά) και Ρεύματα στο εσωτερικό του αντικειμένου προς θέρμανση (δεξιά)

2.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Θεωρητικά τρία (3) είναι τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν την Επαγωγική Διάταξη:

- Μια πηγή Υψηλών Συχνοτήτων (Inverter).
- Το πηνίο εργασίας (work coil).
- Το αντικείμενο προς θέρμανση (work piece).

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα της διάταξης της Επαγωγικής Θέρμανσης.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα διάταξης της Επαγωγικής θέρμανσης

Στην πραγματικότητα, τα συστήματα Επαγωγικής Θέρμανσης είναι πιο σύνθετα.

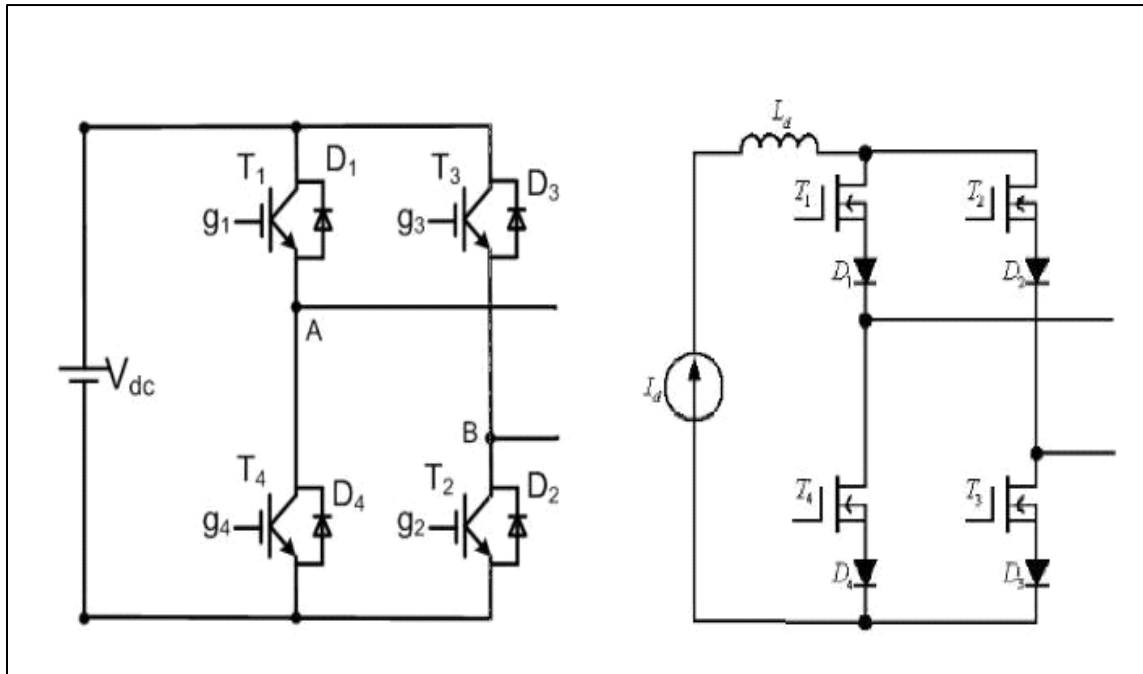
Υπάρχουν ακόμη, το σύστημα ανόρθωσης, το φίλτρο εξομάλυνσης, το φίλτρο αντιστάθμισης-συντονισμού, καθώς επίσης και τα συστήματα παλμοδότησης του Inverter και σβέσης του πηνίου εργασίας. Κάποιες φορές παρεμβάλλεται ένας Μετασχηματιστής ανάμεσα στον Inverter το κύκλωμα αντιστάθμισης- συντονισμού. Είτε για γαλβανική απομόνωση είτε για μεταβολή του λόγου των ρευμάτων, Ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες μετά από τον Inverter τοποθετείται ένας πυκνωτής πυκνωτής για να “κόβει” την DC συνιστώσα που παράγει ο Inverter.

Μια σύντομη περιγραφή του συστήματος είναι η εξής: Η AC τάση του δικτύου μετατρέπεται σε DC και ακολουθεί εξομάλυνση με την τοποθέτηση κατάλληλου φίλτρου. Ο Inverter, με τη σειρά του, και αφού πρώτα έχει δεχθεί κατάλληλους παλμούς από το σύστημα παλμοδότησης, δημιουργεί AC τάση κατάλληλης- επιθυμητής τιμής και συγκεκριμένης συχνότητας. Μεταξύ του Inverter του πηνίου εργασίας μεσολαβεί το φίλτρο συντονισμού. Αυτό έχει τοποθετηθεί για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατό καλύτερη μεταφορά ενέργειας από τον Inverter στο πηνίο εργασίας. Όταν το επιθυμητό AC σήμα φτάσει στο πηνίο εργασίας, αυτό με την σειρά του δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και τελικά ζεσταίνει το αντικείμενο προς θέρμανση. Σε αυτό το σημείο ενεργοποιείται και το σύστημα σβέσης, το οποίο έχει σκοπό να απομακρύνει την ερμότητα που δημιουργείται στο πηνίο εργασίας και η οποία δεν είναι επιθυμητή, όσο φορά το σύστημα της Επαγωγικής Θέρμανσης.

2.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ

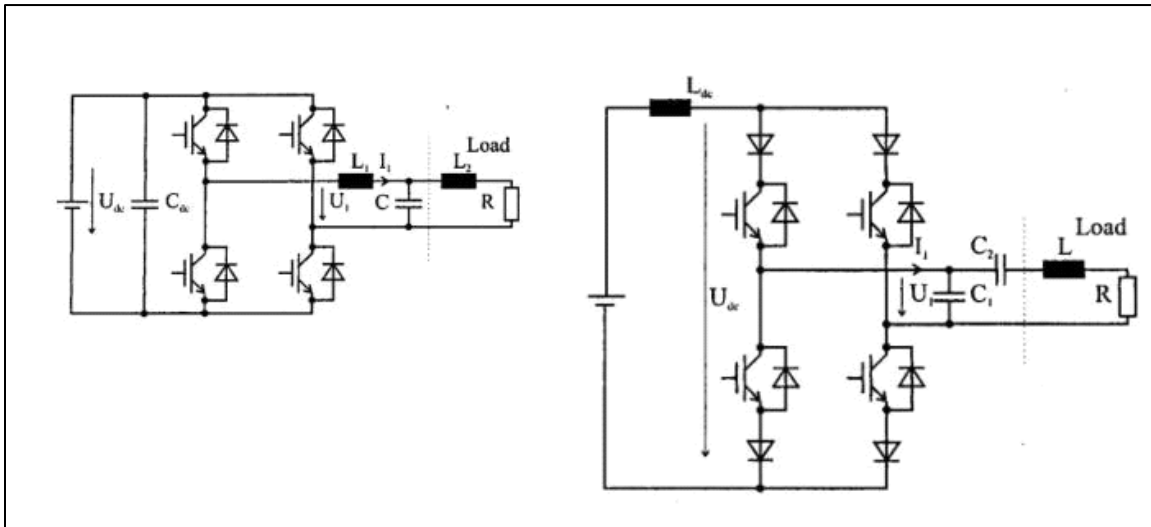
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες τοπολογίες αντιστροφέα, οι οποίες συνηθίζουν να βρίσκουν εφαρμογή στις Επαγωγικές Διατάξεις. Δεν γίνεται περαιτέρω διερεύνηση όσο αφορά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τοπολογιών αυτών. Ούτε σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων μεταξύ τους.

Μια πρώτη διάκριση ανάμεσα στις τοπολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ανάμεσα σε τοπολογία μισής η πλήρους γέφυρας, όπως αναφέρεται. Μια άλλη διάκριση είναι ως προς την πηγή τροφοδοσίας του αντιστροφέα, που θα μπορούσε να είναι μια πηγή τάσης ή μια πηγή ρεύματος.



Εικόνα 2.2 Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας με πηγή τάσης (αριστερά) και με πηγή ρεύματος (δεξιά)

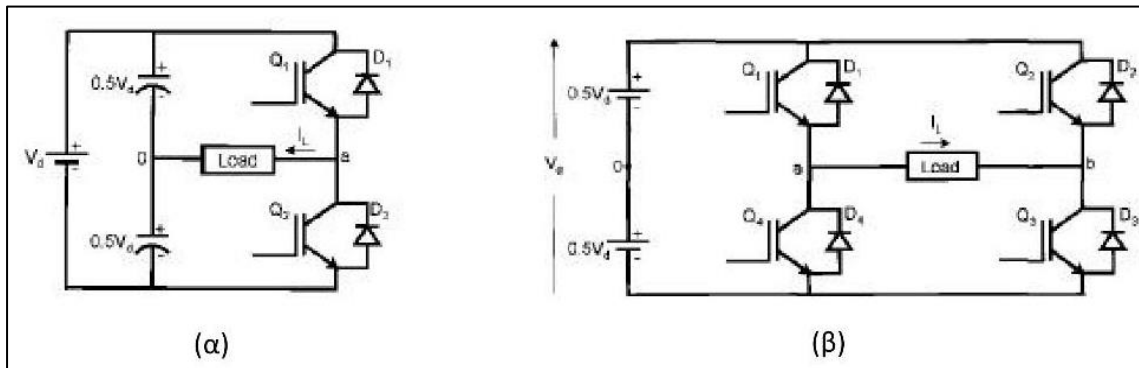
Συνήθως η χρήση του αντιστροφέα (Εικόνα 2.2, 2.3) που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζει και το είδος του κυκλώματος αντιστάθμισης-συντονισμού που θα χρησιμοποιηθεί. Σε πολλά άρθρα αναφέρεται, επίσης, ότι προτιμάται η χρήση αντιστροφείων με «ομαλή σβέση», «Soft Switching», όπως συνηθίζεται να ονομάζεται στην αγγλική ορολογία. Και εδώ συναντάται η διάκριση ανάμεσα σε «Zero-voltage switching», η οποία αναφέρεται σε περιορισμό των απωλειών κατά την έναυση μέσω του ελέγχου της τάσης και σε «Zero-current switching», όπου περιορίζονται οι απώλειες όταν το κύκλωμα κλείνει με έλεγχο του ρεύματος.



Εικόνα 2.3 Αντιστροφέας πηγή τάσης με LL-C φίλτρο (αριστερά) και με πηγή ρεύματος με CC-L (δεξιά)

2.5 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

Σκοπός των αντιστροφέων Dc-Ac είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς ac τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος της όσο και την συχνότητα της. Η έξοδος των αντιστροφέων μπορεί να είναι είτε μιας φάσης είτε τριών. Ενώ, η είσοδος τους μπορεί να είναι είτε μια πηγή τάσης, είτε μια πηγή ρεύματος. Τότε, μιλάμε, για αντιστροφέις πηγής τάσης και για αντιστροφέις πηγής ρεύματος, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.4 6Κύκλωμα αντιστροφέα (α) ημι-γέφυρας (β) πλήρης γέφυρα

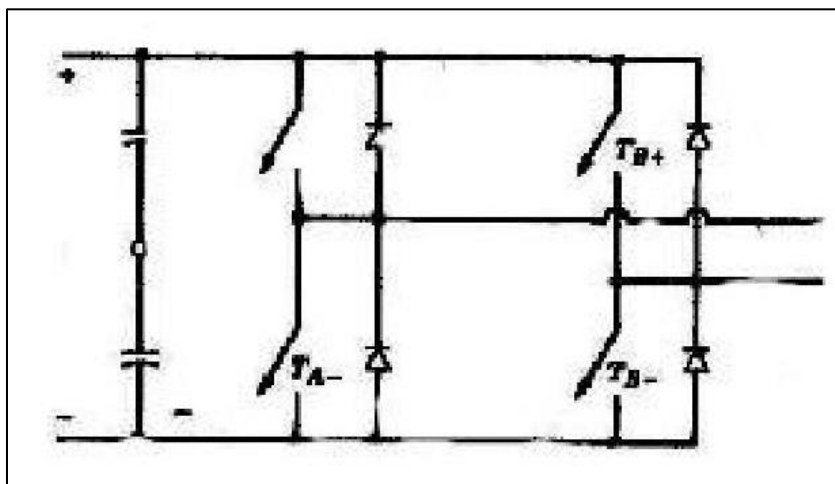
Τα δύο κύρια κυκλώματα μονοφασικού αντιστροφέα είναι αυτό της ημι-γέφυρας και της πλήρης γέφυρας. Στην παρούσα πτυχιακή, επιλέγεται, η χρήση αντιστροφέα πλήρης γέφυρας εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της έναντι του αντιστροφέα ημι-γέφυρας.

2.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΜΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑ

Ανεξάρτητα από τις καταστάσεις των διακοπών, το ρεύμα μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών C+ και C-. (που έχουν ίσες και πολύ μεγάλες χωρητικότητες). Όταν ο T+ είναι κλειστός, άγει είτε ο T+ είτε η D+, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου και το i_o μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών. Παρόμοια, όταν ο διακόπτης T- είναι κλειστός, άγει είτε ο T- είτε η D-, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου και το i_o μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών. Επομένως, οι πυκνωτές C+ και C- είναι "ουσιαστικά" συνδεδεμένοι παράλληλα στην πορεία του i_o . Αυτό, εξηγεί επίσης, γιατί το σημείο σύνδεσης "ο" παραμένει στο μισό δυναμικό. Εφόσον το i_o ρέπει να περάσει από τον παράλληλο συνδυασμό των C+ και C-, το i_o μόνιμη κατάσταση ισορροπίας δεν έχει dc συνιστώσα. Επομένως, οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν ως πυκνωτές αποκοπής του dc, εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα κορεσμού του μετασχηματιστή από την πλευρά του πρωτεύοντος, αν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής στην έξοδο για να παρέχει ηλεκτρική απομόνωση. Εφόσον το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα ενός τέτοιου μετασχηματιστή δεν θα εξαναγκάζεται σε μηδενισμό με κάθε μετάβαση, η ενέργεια της αυτεπαγωγής διαρροής του μετασχηματιστή δεν παρουσιάζει πρόβλημα στους διακόπτες.

2.7 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΕΦΥΡΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ)

Ο αντιστροφέας αυτός (Εικόνα 2.5) αποτελείται από δύο αντιστροφείς ενός σκέλους και προτιμάται σε σχέση με άλλες διατάξεις σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος.



Εικόνα 2.5 Αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα

Με την ίδια dc τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι ιδιπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια

ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.

2.8 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

Η επιλογή της ισχύος είναι το ίδιο σημαντική όσο και της συχνότητας. Τόσο η πυκνότητα ισχύος όσο και ο χρόνος θέρμανσης μπορούν να παράγουν πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς με ίδια ή διαφορετικά αποτελέσματα. Η επιλογή αυτών των δύο παραμέτρων εξαρτάται από τον τύπο θέρμανσης, τις εσωτερικές θερμικές απώλειες του αντικειμένου προς θέρμανση και την διάταξη θέρμανσης (πηνίο εργασίας) για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Παραδείγματος χάρη, για επιφανειακή θέρμανση μικροί χρόνοι με μεγάλες ποσότητες ισχύος απαιτούνται.

Πυκνότητα Ισχύος για ένα πηνίο εργασίας είναι η μετρούμενη ισχύ εξόδου διαιρεμένη από την συνολική επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση με μονάδα μέτρησης KW/cm².

Οι απαιτήσεις ισχύος αναφέρονται στο σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για την θέρμανση του αντικειμένου προς θέρμανση και τις απώλειες (ακτινοβολία, συναγωγή). Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση του αντικειμένου προς θέρμανση μπορεί να υπολογιστεί όταν το υλικό από το οποίο προέρχεται, η ειδική θερμότητα του και βάρος του είναι γνωστά. Είναι η ενέργεια που πρέπει να μεταφερθεί από το πηνίο εργασίας στο αντικείμενο προς θέρμανση και δεν αφορά ενέργεια που καταναλώνεται και εκφράζει απώλειες στο πηνίο, απώλειες μεταφοράς, μετατροπής κ.τ.λ.

Εάν είναι γνωστές οι απαιτήσεις ισχύος για την θέρμανση του δοκιμίου και οι απώλειες μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ενέργεια- ισχύ που απαιτείται να παρέχει το πηνίο εργασίας. Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο προς θέρμανση χρειάζεται 50KW για να θερμανθεί και οι απώλειες του συστήματος είναι 50%, τότε η ελάχιστη ισχύ εξόδου της πηγής ενέργειας είναι 100KW. Η ικανότητα μεταφοράς της ενέργειας της πηγής στο πηνίο εργασίας, εξαρτάται από το κύκλωμα σύνδεσης- συντονισμού.

Η επιφανειακή θέρμανση χρησιμοποιείται στην επιφανειακή σκλήρυνση χαλύβδινων μερών, όπως βίδες, γρανάζια κ.τ.λ. Σε αυτού του είδους τις εφαρμογές υψηλές πυκνότητες ισχύος και μικροί χρόνοι θέρμανσης χρησιμοποιούνται όταν το βάθος διείσδυσης είναι μικρό. Οι πυκνότητες αυτές επιλέγονται για την επίτευξη γρήγορης θέρμανσης. Όμως η συχνότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Υψηλότερες συχνότητες και υψηλότερες πυκνότητες προκαλούν μικρότερα βάθη διείσδυσης. Επομένως, μικρότερες συχνότητες σε υψηλότερες πυκνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν το ελάχιστο δυνατό βάθος διείσδυσης.

Στην δια μέσου θέρμανση για να μεταδοθεί θερμότητα στο κέντρο του αντικειμένου προς θέρμανση, οι ρυθμοί θέρμανσης για την δια μέσου σκλήρυνση του χάλυβα είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς που χρησιμοποιούνται στην επιφανειακή σκλήρυνση. Μετά από λίγο, ο ρυθμός αύξησης της θέρμανσης της επιφάνειας και του κέντρου γίνεται συγκρίσιμος εξαιτίας της αγωγής (conduction) και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και κέντρου γίνεται συγκεκριμένη και πάντα θα υπάρχει ειδικά όσο η διάμετρος του αντικειμένου προς θέρμανση αυξάνεται.

2.9 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ

Σημαντικό ρόλο στην Διάταξη της Επαγωγικής Θέρμανσης παίζει το κύκλωμα αντιστάθμισης - συντονισμού. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα γίνεται μια σύντομη αναφορά στον συντονισμό και στον τρόπο υλοποίησής του.

Σε πάρα πολλές εφαρμογές, έτσι και στην Επαγωγική Θέρμανση, γίνεται προσπάθεια ο συντελεστής ισχύος να γίνει ίσος με την μονάδα. Αυτό πραγματοποιείται με την κατάλληλη τοποθέτηση πυκνωτών (και σπανιότερα πηνίων), έτσι ώστε το φορτίο που θα «βλέπει» η πηγή να είναι, όσο το δυνατόν γίνεται, ωμικό. Σκοπός είναι το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στο φορτίο να είναι ενεργή και να περιοριστεί (αν είναι εφικτό να επαλειφθεί) η άεργος ισχύς.

Για να γίνει κατανοητό το πώς αποθηκεύεται ή σπαταλιέται η ενέργεια σε διάφορα στοιχεία σε ένα κύκλωμα συντονισμού, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η φύση της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα τους και του ρεύματος που τα διαρρέει. Όταν μια AC τάση εφαρμόζεται στα άκρα μιας αντίστασης R, η πτώση τάσης στα άκρα της είναι σε φάση με το ρεύμα που την διαρρέει και είναι ίση με $V = I \times R$. Από την άλλη μεριά, σε ένα πυκνωτή ή ένα πηνίο, η τάση και το ρεύμα βρίσκονται σε διαφορά φάσης μεταξύ τους. Στον πυκνωτή το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά 90° , ενώ στο πηνίο καθυστερεί κατά 90° . Έτσι η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι ίση με $V_c = I \times X_c$ και η τάση στα άκρα του πηνίου ίση με $V_L = I \times X_L$.

2.10 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ, ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

Η συχνότητα συντονισμού είναι η συχνότητα κατά την οποία $X_L = X_C$ και δίδεται από την σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi LC} \text{ (Hz)} \quad (2.1)$$

Η σχέση (2.1) ισχύει τόσο κατά τον συντονισμό σειράς όσο και κατά τον παράλληλο συντονισμό. Κατά την Επαγωγική Θέρμανση η συχνότητα συντονισμού επιλέγεται να είναι ίση ή πάρα πολύ κοντά στην συχνότητα που παράγει ο αντιστροφέας. Ίση δηλαδή με την συχνότητα που απαιτείται για να προκαλέσει το απαιτούμενο βάθος διείσδυσης δ .

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το φορτίο είναι ωμικό- επαγωγικό (όμοια συμβαίνει και στην Επαγωγική Θέρμανση), οπότε αρκεί να τοποθετηθεί ένα πυκνωτής κατάλληλα με το υπόλοιπο κύκλωμα έτσι ώστε να επιτευχθεί ο συντονισμός. Για τον λόγο αυτό σχέση (2.1) λύνεται ως προς C και έτσι προκύπτει:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot (1/L)} \text{ (F)} \quad (2.2)$$

Στην Επαγωγική θέρμανση χρησιμοποιούνται δύο τύποι πυκνωτών: οι πυκνωτές λαδιού για συχνότητες 10,000 Hz και οι κεραμικοί για συχνότητες μικρότερες των 50 KHz. Η συνήθης μονάδα μέτρησης των πυκνωτών είναι το Farad (F), επειδή, όμως, είναι πολύ μεγάλη μονάδα συνήθως χρησιμοποιείται το μF ή το mF . Σε πολλές εφαρμογές και στην Επαγωγική Θέρμανση όμως, σαν μονάδα χρησιμοποιείται η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής (KVAR). Αυτό συμβαίνει επειδή, για διάφορους λόγους μπορεί να αλλάξει η τάση της πηγής ή συχνότητα της οπότε αυτόματα αλλάζει και η χωρητικότητα και κατ'επέκταση η άεργος ισχύς που προσφέρει στην διάταξη. Αν κάποιος θέλει να υπολογίσει την άεργο ισχύ που προσφέρει ο πυκνωτής για συγκεκριμένη τάση και συχνότητα, μπορεί να το κάνει μέσω της σχέσης:

$$Q_c = (2\pi f CV^2)/1000 \text{ (KVAR)} \quad (2.3)$$

Ο λόγος της επαγωγικής αντίδρασης προς την αντίσταση του κυκλώματος, συχνά, ονομάζεται συντελεστής ποιότητας και συμβολίζεται με Q. Τα κυκλώματα που έχουν υψηλό συντελεστή ποιότητας παράγουν μεγαλύτερα ρεύματα. Ο συντελεστής ποιότητας για ένα συντονισμένο κύκλωμα μεταβάλλεται από 20 έως 100. Ο συντελεστής ποιότητας προσφέρει, ακόμη, μια σύγκριση ανάμεσα στην συνολική ενέργεια του συντονισμένου κυκλώματος και στην ενέργεια που καταναλώνεται στην συνολική αντίσταση του κυκλώματος. Επειδή ένα «καθαρό» πηνίο ή πυκνωτής δεν καταναλώνουν ενέργεια, οι απώλειες του κυκλώματος μειώνονται με την μείωση της τιμής της αντίστασης. Επομένως, κατά την Επαγωγική Θέρμανση, επειδή σημαντικό μέρος της αντίστασης εμφανίζεται στο πηνίο εργασίας, η αντίστασή του πρέπει να μειωθεί για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη απόδοση (efficiency η).

2.11 ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ - ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα (και κατ' επέκταση η χρήση) του κάθε κυκλώματος συντονισμού στην Επαγωγική Θέρμανση και παρουσιάζεται ένα «βελτιωμένο» κύκλωμα που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των πλεονεκτημάτων του έναντι των δύο άλλων κυκλωμάτων που έχουν ήδη αναφερθεί.

2.11.1. Πυκνωτής Σε Σειρά

Το πηνίο εργασίας συντονίζεται στην επιδιωκόμενη συχνότητα με την τοποθέτηση ενός πυκνωτή σε σειρά. Η τοποθέτηση του πυκνωτή σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα «κάνει» το ρεύμα στο φορτίο ημιτονοειδή. Επίσης, αυξάνεται η τάση στα άκρα του πηνίου εργασίας σε σχέση με την τάση που θα έβλεπε το πηνίο εργασίας αν μεταξύ αυτού και του Inverter δεν μεσολαβούσε ο πυκνωτής. Το ρεύμα εξόδου του Inverter είναι το ίδιο με το ρεύμα που βλέπει το πηνίο εργασίας. Για τον λόγο αυτό, το πηνίο εργασίας συχνά αποτελείται από πολλές σπείρες, οι οποίες διαρρέονται από μικρό ρεύμα. Η τοποθέτηση του πυκνωτή σε σειρά συνήθως χρησιμοποιείται σε εστίες μαγειρέματος (rice cookers) όπου τα επίπεδα ισχύος είναι χαμηλά και ο Inverter τοποθετείται κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση. Το κύριο μειονέκτημα της τοποθέτησης του πυκνωτή κατά αυτό τον τρόπο είναι ότι ο Inverter πρέπει να μεταφέρει το ίδιο ρεύμα με το πηνίο εργασίας. Επιπρόσθετα, η τάση αυξάνεται εξαιτίας της σύνδεσης σε σειρά του πυκνωτή όταν το φορτίο δεν είναι συγκεκριμένο και μπορεί να βυθίσει το κύκλωμα. Αυτό δεν είναι πρόβλημα στις εφαρμογές όπως εστίες μαγειρέματος επειδή το αντικείμενο προς θέρμανση δεν αλλάζει και οι απαιτήσεις είναι γνωστές από την αρχή του σχεδιασμού του συστήματος.

2.11.2. Πυκνωτής Παράλληλα

Η τοποθέτηση του πυκνωτή παράλληλα με το υπόλοιπο κύκλωμα «κάνει» το ρεύμα στο φορτίο ημιτονοειδή. Ο παράλληλος συντονισμός αυξάνει το ρεύμα που ρέει στο πηνίο εργασίας, πολύ περισσότερο από το ρεύμα που είναι ικανό να παρέχει από μόνος του ο Inverter. Έτσι μειώνονται σημαντικά οι διατομές των καλωδίων μεταξύ Inverter και πηνίου εργασίας και οι απώλειες αγωγής στον Inverter και στα καλώδια σύνδεσης. Επομένως, το πηνίο εργασίας μπορεί να τοποθετηθεί πολύ μακριά από τον Inverter χωρίς την αύξηση των απωλειών εξαιτίας του μεγάλου μήκους καλωδίου.

Τα πηνία εργασίας στα οποία είναι τοποθετημένος ο πυκνωτής παράλληλα, συχνά,

αποτελούνται από λίγες σπείρες χοντρού χαλκού αλλά με μεγάλα ρεύματα πολλών εκατοντάδων ή χιλιάδων Ampere .

Υπάρχουν πάντα απώλειες στο κύκλωμα συντονισμού εξαιτίας των διηλεκτρικών απωλειών στον πυκνωτή και του επιδερμικού φαινομένου στο πηνίο εργασίας. Έτσι ένα μικρό ρεύμα πάντα ρέει από τον Inverter ακόμη και χωρίς αντικείμενο προς θέρμανση. Όταν ένα αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα στο πηνίο εργασίας, τότε οι απώλειες του συστήματος αυξάνονται. Επομένως, το ρεύμα του κυκλώματος συντονισμού αυξάνεται όταν το αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα στο πηνίο εργασίας.

2.10.3. Κύκλωμα LLC

Η προσθήκη ενός πηνίου και ενός πυκνωτή (L_M, C_M), προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των δυο προηγούμενων κυκλωμάτων συντονισμού. Εκτός από την τετραγωνική τάση που παράγει ο αντιστροφέας στην θεμελιώδη συχνότητα, παράγει και μια σειρά αρμονικών σε υψηλότερες συχνότητες. Έτσι τα ρεύματα που θα προέκυπταν αν υπήρχε πχ το παράλληλο κύκλωμα συντονισμού θα ήταν τεράστια εξαιτίας της μείωσης της τιμής της χωρητικής αντίδρασης με την αύξηση των συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό πιθανόν να είναι πολύ καταστροφικό για τον αντιστροφέα, καθώς κατά τις μεταβάσεις έναυσης και σβέσης γίνεται προσπάθεια φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή. Η προσθήκη του πηνίου L_M και του πυκνωτή C_M αναιρεί αυτό το πρόβλημα. Επειδή η έξοδος του αντιστροφέα «βλέπει» πρώτα το πηνίο L_M και όλες οι αρμονικές «βλέπουν» μια σταδιακά αυξανόμενη επαγωγική αντίδραση. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο ρεύμα ρέει στην επιδιωκόμενη συχνότητα και το ρεύμα των αρμονικών περιορίζεται σημαντικά, εξομαλύνοντας έτσι το ρεύμα του φορτίου. Τέλος, με σωστό συντονισμό του συγκεκριμένου κυκλώματος παράγεται ένα επαγωγικό φορτίο. Έτσι καθώς το ρεύμα καθυστερεί μειώνει τις απώλειες έναυσης στους Zero – Voltage - Switching αντιστροφέας.

Συνοπτικά προκύπτει ότι με το συγκεκριμένο κύκλωμα:

- Η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα καταλήγει στο αντικείμενο προς θέρμανση.
- Εξασφαλίζει την προστασία του αντιστροφέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πηνίο είναι ένα από τα κύρια εξαρτήματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Πρόκειται για ένα συρμάτινο τύλιγμα που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα. Οι ιδιότητες των πηνίων και το φαινόμενο της αυτεπαγωγής μελετήθηκαν από τον Αμερικανό φυσικό Τζόζεφ Χένρι το 1823 (Serway R. & Jewett J., 2013)

3.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΗΝΙΩΝ

Διάκριση όσο αφορά την μορφή των πηνίων μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους μια πρώτη προσέγγιση είναι ο διαχωρισμός τους με βάση το πλήθος των αντικειμένων που θερμαίνουν. Όταν το πηνίο θερμαίνει μόνο ένα αντικείμενο είναι «μιας θέσης πηνίο- single-place coil». Όταν το πηνίο θερμαίνει περισσότερα από ένα αντικείμενα είναι «πολλών θέσεων πηνίο- multi-place coil». Ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμένων που θερμαίνει μπορεί να είναι δύο θέσεων, τριών θέσεων κ.λ.π.

Μια άλλη διάκριση είναι με βάση το πλήθος των σπειρών. Αν το πηνίο αποτελείται από μια σπείρα χαρακτηρίζεται ως «μιας σπείρας πηνίο – single-turn coil», εάν αποτελείται από περισσότερες σπείρες τότε ονομάζεται «πολλών σπειρών πηνίο – multi-turns coil».

Άλλοι τρόποι διάκρισης των πηνίων είναι η μορφή που έχει το πηνίο, ο τρόπος δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου, η εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται κ.α. Πολλές φορές ένα πηνίο μπορεί να τηρεί τις προϋποθέσεις για να ενταχθεί σε περισσότερες από μια κατηγορίες. Π.χ. το πηνίο πεταλούδα εκτός από την κατηγορία μορφή μπορεί να ενταχθεί και στην κατηγορία των πηνίων εγκάρσιας ροής.

3.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΠΗΝΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Υπάρχουν δύο κατηγοριοποιήσεις πηνίων που σχετίζονται με την κατεύθυνση των δινορευμάτων, που παράγονται από το πηνίο εργασίας στο αντικείμενο προς θέρμανση:

Διαμήκης ροής (αντίθετη της ροής ρεύματος) πηνία: Είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα με τον σωληνοειδή τύπο πηνίου πιο συχνά να χρησιμοποιείται. Τα πηνία αυτά περικυκλώνουν- τυλίγουν το αντικείμενο προς θέρμανση, με τις σπείρες στις αντίθετες πλευρές του, ώστε το επαγόμενο ρεύμα να ρέει γύρω από το αντικείμενο προς θέρμανση. Όταν το κενό (air gap) μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση είναι ικανοποιητικό, η ικανότητα θέρμανσης αυξάνεται επειδή οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που περνούν μέσα από το αντικείμενο προς θέρμανση αυξάνονται. Τα σωληνοειδή πηνία εμφανίζονται σε πολλές μορφές, σχήματα και παραλλαγές με το κυλινδρικό πηνίο ως την πιο απλή μορφή.

Εγκάρσιας ροής πηνία: Τα πηνία αυτού του τύπου δεν είναι ευρέως διαδεδομένα για την χρήση τους και χρησιμοποιούνται για την θέρμανση αντικειμένων όπου η διατομή του αντικειμένου προς θέρμανση είναι μικρότερη από το γινόμενο $4 \times \delta$, όπου δ το βάθος διείσδυσης. Το αντικείμενο προς θέρμανση είναι τοποθετημένο ανάμεσα στις σπείρες του πηνίου και το ρεύμα ρέει προς την ίδια κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει αναίρεση ρεύματος και τα λεπτά σε διατομή αντικείμενα προς θέρμανση μπορούν να ζεσταθούν εξίσου καλά.

3.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΗΝΙΟΥ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του πηνίου εργασίας είναι οι εξής:

- Οι διαστάσεις και το σχήμα του αντικειμένου προς θέρμανση.
- Ο αριθμός των αντικειμένων που θα ζεσταθούν.
- Η επιθυμητή διάταξη σκλήρυνσης.
- Η μέθοδος παραγωγής (πχ scanning or short shot).
- Η συχνότητα.
- Η ισχύς εισόδου.
- Ο τρόπος σβέσης του αντικειμένου προς θέρμανση.
- Η επιθυμητή διάρκεια ζωής και ο τρόπος χρήσης του πηνίου.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό όλοι αυτοί οι παράμετροι είναι σημαντικό να ληφθούν υπό όψη κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του πηνίου. Ο καθένας ξεχωριστά, αλλά και όλοι μαζί καθορίζουν αν το πηνίο θα επιτύχει το «σκοπό» του.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας πολύ από τους παραπάνω παράγοντες θα αγνοηθούν κατά τους υπολογισμούς, ενώ σε κάποιους άλλους θα γίνει μόνο μια τυπική θεωρητική αναφορά στο πως επηρεάζουν τον ρόλο του πηνίου.

Επίσης γίνεται εμφανές ότι η μελέτη προσεγγίζει την χρήση της Επαγωγικής Θέρμανσης για την σκλήρυνση κάποιου αντικειμένου. Όπως, όμως έχει ήδη προαναφερθεί η Επαγωγική Θέρμανση δεν περιορίζεται μόνο σε αυτή την εφαρμογή. Στα πλαίσια λοιπόν κάποιας άλλης εφαρμογής πχ σφράγισμα μπουκαλιών κάποιοι από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγούμενα αγνοούνται, προστίθενται κάποιοι άλλοι, ενώ μπορεί να μεταβάλλεται η επίδραση των παραγόντων που παραμένουν. Αλλάζουν οι τύποι υπολογισμού των διάφορων παραμέτρων, ο χρόνος που απαιτείται για την θέρμανση, η ακρίβεια και η λεπτομέρεια για το βάθος διείσδυσης κ.α.

Σε κάποιες περιπτώσεις, εξαρτάται από την διαδικασία που χρησιμοποιείται, διαφορετικοί τύποι πηνίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης, το ίδιο πηνίο που χρησιμοποιείται σε συστήματα υψηλής ισχύος πχ επιφανειακή θέρμανση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα χαμηλής ισχύος για δια μέσου θέρμανση.

Πολλά πηνία κατασκευάζονται βασισμένα στην γνώση των αρχών σχεδιασμού του πηνίου και στην εμπειρία, ενώ άλλα πηνία σχεδιάζονται με βάση προγράμματα προσομοίωσης έτσι ώστε να προσαρμοστούν στο αντικείμενο προς θέρμανση. Παρ όλα αυτά, στην παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα χρησιμοποιηθεί κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης για τον υπολογισμό των διαστάσεων του πηνίου εργασίας.

Προϋποθέσεις σχεδιασμού για καλή- μεγάλη ικανότητα σύζευξης:

1. Το πηνίο πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο κοντά γίνεται στο αντικείμενο προς θέρμανση για την μέγιστη μεταφορά ισχύος. Έτσι ο μέγιστος αριθμός μαγνητικών γραμμών θα εισχωρήσει στο αντικείμενο προς θέρμανση. Όσο πιο πυκνό είναι το μαγνητικό πεδίο τόσο πιο μεγάλα ρεύματα θα αναπτύσσονται. Οι απαιτήσεις της απόστασης μεταξύ πηνίου και αντικείμενου μπορούν να εξαρτηθούν και από άλλους παράγοντες όπως, πως το αντικείμενο που θα θερμανθεί ή η θέση που θα έχει σχετικά με το πηνίο, το σχήμα και η περιοχή που θα θερμανθεί.

2. Το μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών συγκεντρώνεται στα άκρα του πηνίου εργασίας και μειώνονται όσο κινούμεθα προς το κέντρο του. Επομένως, στο κέντρο του πηνίου εργασίας το μαγνητικό πεδίο είναι εξασθενημένο και ο ρυθμός θέρμανσης είναι μεγαλύτερος στα άκρα. Επίσης, αν ένα αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μακριά από το κέντρο του πηνίου εργασίας, η περιοχή του αντικείμενου που είναι πιο κοντά στις σπείρες του πηνίου δέχεται μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών και θερμαίνεται περισσότερο. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο στις υψηλές συχνότητες.

3.5 ΠΗΝΙΑ ΠΟΛΛΩΝ ΣΠΕΙΡΩΝ ΚΑΙ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Οι απαιτήσεις για ομοιόμορφη θέρμανση και το μήκος του πηνίου είναι οι δύο βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή ανάμεσα σε πηνίο με πολλές σπείρες ή πηνίο μίας σπείρας. Ένα πηνίο πολλών σπειρών με σωστή και ίση απόσταση μεταξύ των σπειρών και καλή σύζευξη με το αντικείμενο προς θέρμανσης μπορεί να αναπτύξει ομοιόμορφη θέρμανση. Παρόμοια ομοιομορφία μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της απόστασης μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο κάθε σπείρας να διασταυρωθεί με αυτά που αναπτύσσονται δίπλα του. Ωστόσο, αυτή η μεταβολή μειώνει την μεταφορά θερμότητας. Όπου, μικροί ρυθμοί θέρμανσης απαιτούνται, για παράδειγμα στην συνεχή θέρμανση, η μεταβολή αυτή της σύζευξης είναι αποδεκτή. Όταν όμως απαιτούνται μεγάλοι ρυθμοί θέρμανσης δεν επιτρέπεται η αύξηση της απόστασης μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου θέρμανσης.

Παρατηρείται ότι όσο το μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση αυξάνεται, γίνεται μετάβαση από το πηνίο μίας σπείρας στο πηνίο πολλών σπειρών. Και καθώς, το μήκος του αντικειμένου αυξάνεται, αυξάνεται ο αριθμός των σπειρών που απαιτούνται.

Όταν το μήκος του πηνίου εργασίας υπερβεί 4 στις 8 φορές την διάμετρο του, η ομοιόμορφη θέρμανση με υψηλές πυκνότητες ισχύος είναι δύσκολη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μίας σπείρας ή πολλών σπειρών πηνία, τα οποία μπορούν να σαρώσουν το μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση προτιμώνται. Τα πηνία πολλών σπειρών, γενικά, βελτιώνουν την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας. Τα πηνία μίας σπείρας είναι επίσης αποτελεσματικά για στενές ζώνες- λωρίδες θερμότητας που είναι σε συμφωνία με την διάμετρο του αντικειμένου προς θέρμανση.

Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου και του βέλτιστου ενός πηνίου μίας σπείρας ποικίλει κάπως με το μέγεθος. Ένα μικρό πηνίο μπορεί να φτιαχτεί με ύψος ίσο με την διάμετρο του επειδή το ρεύμα είναι συγκεντρωμένο σε μια μικρή περιοχή. Σε μεγαλύτερο πηνίο, το ύψος δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της διαμέτρου. Καθώς το άνοιγμα του πηνίου αυξάνεται, ο ρυθμός μειώνεται πχ ένα 5.1 cm ID πηνίο πρέπει να έχει 1.91 cm μέγιστο ύψος και ένα 10.2 cm ID πηνίο πρέπει να έχει 2.5 cm μέγιστο ύψος.

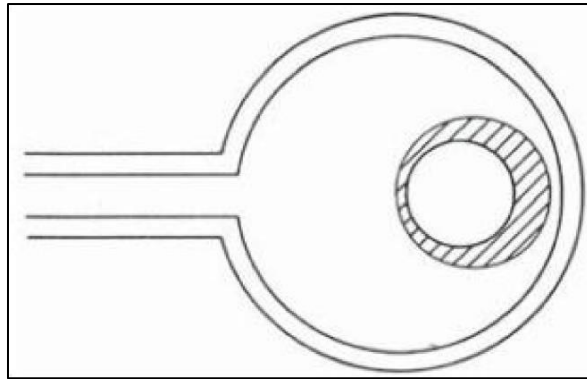
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΗ

Προϋποθέσεις σχεδιασμού για καλή- μεγάλη ικανότητα σύζευξης:

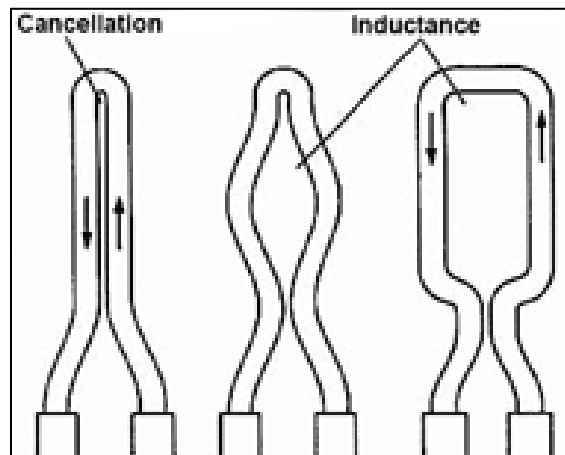
1. Το πηνίο πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο κοντά γίνεται στο αντικείμενο προς θέρμανση για την μέγιστη μεταφορά ισχύος. Έτσι ο μέγιστος αριθμός μαγνητικών

γραμμών θα εισχωρήσει στο αντικείμενο προς θέρμανση. Όσο πιο πυκνό είναι το μαγνητικό πεδίο τόσο πιο μεγάλα ρεύματα θα αναπτύσσονται. Οι απαιτήσεις της απόστασης μεταξύ πηνίου και αντικειμένου μπορούν να εξαρτηθούν και από άλλους παράγοντες όπως, πως το αντικείμενο που θα θερμανθεί ή η θέση που θα έχει σχετικά με το πηνίο, το σχήμα και η περιοχή που θα θερμανθεί.

2. Το μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών συγκεντρώνεται στα άκρα (εικόνα 3.1) του πηνίου εργασίας και μειώνονται όσο κινούμεθα προς το κέντρο του. Επομένως, στο κέντρο του πηνίου εργασίας το μαγνητικό πεδίο είναι εξασθενημένο και ο ρυθμός θέρμανσης είναι μεγαλύτερος στα άκρα. Επίσης, αν ένα αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μακριά από το κέντρο του πηνίου εργασίας, η περιοχή του αντικειμένου που είναι πιο κοντά στις σπείρες του πηνίου δέχεται μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών και θερμαίνεται περισσότερο. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο στις υψηλές συχνότητες.



Εικόνα 3.1 Επαγωγική θέρμανση σε αντικείμενο που δεν είναι τοποθετημένο στο κέντρο



Εικόνα 3.2 Επίδραση του σχεδιασμού του πηνίου στην επαγωγή

3. Ο σχεδιασμός(εικόνα 3.2) των άκρων (leads) του πηνίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται καλή σύζευξη. Στο σημείο όπου τα άκρα και το πηνίο ενώνονται το μαγνητικό πεδίο είναι πιο αδύναμο.
4. Άρα, το μαγνητικό κέντρο του επαγωγέα - πηνίου δεν σημαίνει ότι ταυτίζεται πάντα με το γεωμετρικό του κέντρο. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα πηνία μιας σπείρας. Καθώς, ο αριθμός των σπειρών αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο από κάθε σπείρα προστίθεται, το φαινόμενο αυτό γίνεται λιγότερο σημαντικό. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, πολλές φορές τοποθετείται το αντικείμενο προς θέρμανση όχι ακριβώς στο κέντρο. Σε πολλές εφαρμογές για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη θέρμανση το αντικείμενο προς θέρμανση περιστρέφεται.
5. Το πηνίο εργασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην αναιρεί την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Το πηνίο στα αριστερά στην εικόνα 3.2 δεν έχει επαγωγή επειδή οι απέναντι πλευρές του επαγωγέα είναι πολύ κοντά. Αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ τους δημιουργείται επαγωγή, οπότε αν τοποθετήσουμε αγώγιμο υλικό στο εσωτερικό του πηνίου θα ζεσταθεί. Το πηνίο στα δεξιά παρέχει επιπρόσθετη επαγωγή και είναι πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα καλού πηνίου.
6. Το πηνίο πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να είναι άκαμπτο και να μην κινείται όταν εφαρμοστεί σε αυτό η επιθυμητή ισχύ.
7. Το πηνίο πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να μην υπερθερμαίνεται κατά την χρήση και να μην αναπτύσσει ρωγμές. Επειδή πολλές φορές, τα πηνία χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε υψηλότερες συχνότητες πρέπει να γίνει πρόβλεψη για καλύτερη ακαμψία και καλύτερη ψύξη.
8. Όλα τα πηνία έχουν σημαντικές απώλειες και χρειάζονται καλή ψύξη. Σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ισχύος, είναι καλό το σύστημα ψύξης να διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σύστημα.
9. Το πηνίο πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε οι μαγνητικές γραμμές να παράγουν δινορεύματα, τα οποία θα θερμάνουν τις επιθυμητές περιοχές. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του αντικειμένου προς θέρμανση σημαίνει μεγαλύτερο ρυθμό θέρμανσης. Πηνία μπορούν να σχεδιαστούν σε διαφορετικά σχέδια και μορφές ή με περισσότερες από μια σπείρες. Τα πηνία ραδιοσυχνοτήτων (RF coils) πρέπει να βρίσκονται σε μικρότερες αποστάσεις από το αντικείμενο προς θέρμανση σε σχέση με αυτά των χαμηλών συχνοτήτων. «Συγκεντρωτές» χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τον συντελεστή σύζευξης με αποτέλεσμα την αύξηση των μαγνητικών γραμμών.

3.7 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΝΙΟΥ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Οι μαγνητικής ροής Συγκεντρωτές ή Ενισχυτές χρησιμοποιούνται πολύ αποτελεσματικά για να αυξήσουν την ικανότητα σύζευξης κάποιων πηνίων. Όταν το αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα ή κοντά στο πηνίο εργασίας, το ρεύμα αναδιανέμεται. Ένα σημαντικό μέρος του ρεύματος ρέει κοντά στην επιφάνεια του πηνίου, η οποία βλέπει το αντικείμενο προς θέρμανση. Το υπολειπόμενο ρεύμα συγκεντρώνεται στις πλευρές του πηνίου με το ρεύμα να επάγεται- προκαλείται στην περιοχή κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση και το πηνίο. Μετά την τοποθέτηση του συγκεντρωτή, πρακτικά όλο το ρεύμα συγκεντρώνεται στην επιφάνεια που βλέπει το αντικείμενο προς θέρμανση.

3.8 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

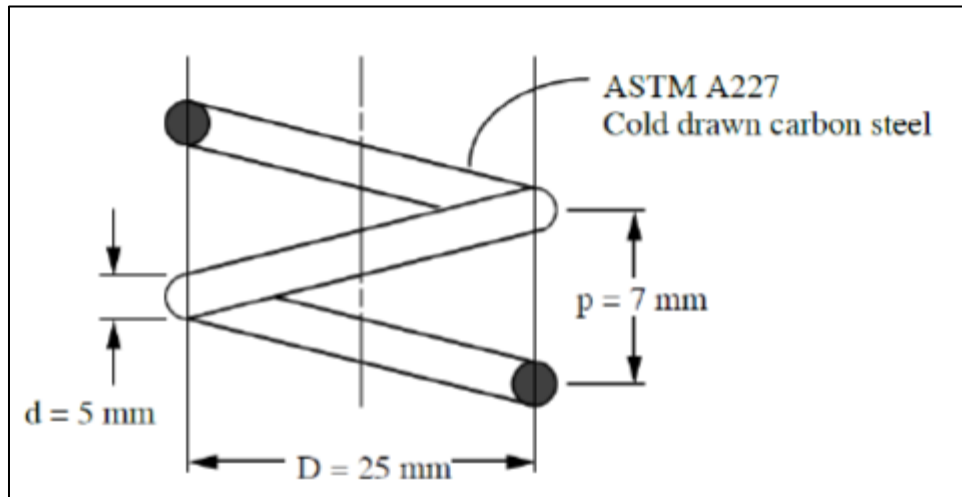
Τα πηνία εργασίας σε χαμηλές συχνότητες ($1\div 10\text{kHz}$) μπορούν να έχουν μηχανικές δονήσεις, οι οποίες απαιτούν άκαμπτη συγκράτηση και τοποθέτηση, ειδικά στην περιοχή του 1kHz . Πολλών σπειρών (σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους) πηνία θα διασκορπίσουν εάν εφαρμοστεί ισχύ και δεν είναι καλά συγκρατημένα. Οι χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για σκλήρυνση με μεγάλο βάθος διείσδυσης και για θέρμανση αντικειμένων μεγαλύτερων διαμέτρων. Πηνία που χρησιμοποιούνται σε συχνότητες μεταξύ $3\div 25\text{kHz}$ εύρος τείνουν να είναι λίγων σπειρών αν και πηνία που χρησιμοποιούνται για συνεχή θέρμανση μπαρών ή σωλήνων μπορούν να είναι πολλών σπειρών, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για σφυρηλάτηση. Συμπαγή πηνία χρησιμοποιούνται σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες τα πηνία είναι κατασκευασμένα από σωλήνα. Στις υψηλές συχνότητες, παρατηρούνται μεγάλες αιχμές, οι οποίες οφείλονται στην μεγαλύτερη συγκέντρωση ρεύματος στην άκρη της μπάρας, η οποία παράγει βαθύτερη θέρμανση. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την επιλογή πηνίου από την άποψη ότι οι υψηλότερες συχνότητες είναι πιο περιορισμένες στην χρήση πλατιών ή πολλών σπειρών πηνία σε συνεχή θέρμανση εξαιτίας του παραπάνω φαινομένου.

3.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Coil pitch (**P**) ή Απόσταση μεταξύ σπειρών ονομάζεται η απόσταση ή αλλιώς το κενό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών σπειρών.

Coupling Distance (**D/2**) - Απόσταση Σύζευξης πηνίου με αντικείμενο προς θέρμανση. Απόσταση Σύζευξης πηνίου με αντικείμενο προς θέρμανση ή απλά σύζευξη πηνίου αντικειμένου ονομάζεται η απόσταση μεταξύ τους και συμβολίζεται με R στην εικόνα 3.3

που ακολουθεί, γίνεται η θεώρηση ότι το αντικείμενο προς θέρμανση είναι τόσο λεπτό που να μπορεί να αναπαρασταθεί από μια αξονική γραμμή.



Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικά πηνίου εργασίας

Όταν χρησιμοποιούνται πηνία με πολλές σπείρες, η απόσταση μεταξύ των σπειρών είναι ευθέως ανάλογη του βάθους διείσδυσης και καθορίζει αν θα υπάρξει ομοιόμορφη θέρμανση ή όχι. Στα πηνία πολλών σπειρών, η απόσταση μεταξύ των σπειρών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου του σωλήνα-απαγωγέα. Αν δεν ισχύει αυτός ο περιορισμός ή σύζευξη με το αντικείμενο προς θέρμανση είναι χαλαρή, και μη-ομοιόμορφη θέρμανση θα επιτευχθεί. Εάν το πηνίο εργασίας τοποθετηθεί κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση, η περιοχή θέρμανσης έχει το ίδιο σχήμα με τα τυλίγματα του πηνίου αλλά ομοιόμορφη θέρμανση από άκρη σε άκρη του αντικειμένου προς θέρμανση δεν θα πραγματοποιηθεί. Αυξάνοντας την σύζευξη μεταξύ πηνίου και αντικειμένου, η θέρμανση γίνεται πιο ομοιόμορφη αλλά το πάχος του αντικειμένου που θερμαίνεται μειώνεται. Μια καλή σχέση απόστασης σύζευξης είναι να είναι ίση με την απόσταση μεταξύ των σπειρών και όχι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των σπειρών για να επιτευχθεί ομοιόμορφη θέρμανση.

Η επιθυμητή απόσταση σύζευξης πηνίου εξαρτάται από τον τύπο της θέρμανσης (στιγμαϊαία ή συνεχή) και τον τύπο του υλικού (σιδηρομαγνητικό ή μη σιδηρομαγνητικό). Στην στατική επιφανειακή θέρμανση, στην οποία το αντικείμενο μπορεί να περιστρέφεται αλλά δεν μετακινείται μέσα στο πηνίο, η απόσταση 0.15 cm συνιστάται. Για συνεχή θέρμανση ή σάρωση, απόσταση 0.19 cm είναι συνήθως απαραίτητη για να επιτρέψει την ποικιλία των αντικειμένων προς θέρμανση. Για δια μέσου θέρμανση (through heating) και μαγνητικά υλικά, πολλών σπειρών πηνία και εφαρμογή χαμηλής ισχύος συνιστώνται. Η απόσταση σύζευξης σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι πιο χαλαρή από 0.64 cm έως 0.95 cm. Εάν το αντικείμενο προς θέρμανση δεν είναι ευθύ, η απόσταση από το πηνίο

πρέπει να μειωθεί. Στις υψηλές συχνότητες, τα ρεύματα του πηνίου είναι χαμηλότερα και σύζευξη πρέπει να αυξηθεί. Σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες τα ρεύματα τα ρεύματα πηνίου είναι συγκριτικά μεγαλύτερα και μπορεί να μειωθεί η απόσταση σύζευξης.

Σε όλα τα πηνία η μαγνητική ροή επηρεάζεται από την διατομή και την μάζα του αντικειμένου προς θέρμανση. Όταν το πηνίο προεξέχει στο τέλος του αντικειμένου προς θέρμανση, βαθύτερη θέρμανση παρατηρείται σε εκείνο το σημείο. Για να μειωθεί αυτό το φαινόμενο το πηνίο πρέπει να μεταφερθεί λίγο πριν το τέλος του αντικειμένου ή να σχεδιαστεί από την αρχή έτσι ώστε να μην υπερκαλύπτει το αντικείμενο προς θέρμανση. Η ίδια κατάσταση συμβαίνει και όταν θερμαίνεται ένας δίσκος ή ένας τροχός. Το βάθος της θέρμανσης θα είναι μεγαλύτερο στις άκρες παρά στο κέντρο.

Το ίδιο συμβαίνει στις τρύπες, στα μεγάλα κενά- σχισμές και στις προεξοχές. Αν το αντικείμενο προς θέρμανση περιέχει μια κεντρική κυκλική τρύπα, ένα επιπρόσθετο δινόρευμα δημιουργείται, το οποίο θα προκαλέσει θερμότητα υψηλότερου βαθμού από ότι στο υπόλοιπο αντικείμενο. Η προσθήκη ενός κομματιού χαλκού (ανάλογου σχήματος) μπορεί να ελέγξει την προκύπτουσα θερμότητα. Για αντικείμενα προς θέρμανση που περιέχουν κενά, το συνεχές πέρασμα του ρεύματος διακόπτεται από το κενό και το ρεύμα πρέπει να ταξιδέψει στο εσωτερικό του αντικειμένου για να «κλείσει» κύκλωμα.

Επειδή το μαγνητικό πεδίο τείνει να συγκεντρωθεί προς το κέντρο κατά μήκος του σωληνοειδούς πηνίου, ο ρυθμός θέρμανσης που παράγεται σε αυτή την περιοχή είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό θέρμανσης που παράγεται προς τα άκρα. Επιπλέον, αν το αντικείμενο προς θέρμανση είναι μεγάλου μήκους, η θέρμανση στα άκρα μειώνεται σημαντικά. Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη θέρμανση κατά μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση, το πηνίο εργασίας πρέπει να τροποποιηθεί. Η τεχνική προσαρμογής των σπειρών μεταξύ τους ή η μεταβολή σύζευξης πηνίου- αντικειμένου είναι δύο από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ομοιόμορφης θέρμανσης.

Στην μέθοδο μεταβολής σύζευξης πηνίου- αντικειμένου, μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση. Πιο συνηθισμένη είναι η πρώτη μέθοδος, η προσαρμογή των σπειρών, κατά την οποία μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των σπειρών και ιδιαίτερα στο κέντρο του πηνίου.

3.10 ΜΟΡΦΗ ΠΗΝΙΟΥ

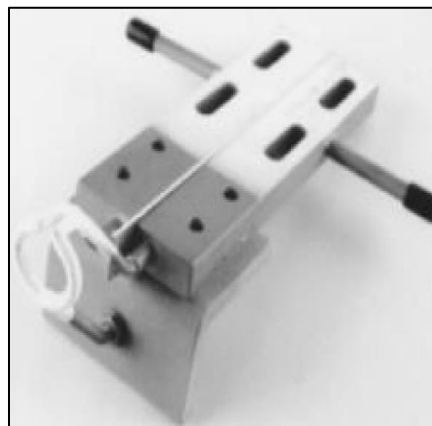
Σωληνοειδή κυκλικά πηνία είναι τα πηνία με τον μεγαλύτερο συντελεστή σύζευξης και χρησιμοποιούνται σε τυπικές εφαρμογές επαγωγικής θέρμανσης, όπως την θέρμανση της εξωτερικής πλευράς του αντικειμένου προς θέρμανση. Ο αριθμός των σπειρών εξαρτάται

από τα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης ισχύος για την θέρμανση του αντικειμένου, τις απαιτήσεις της διάταξης θέρμανσης και τις απαιτήσεις της διαδικασίας. Αντικείμενα προς θέρμανση με υψηλές απαιτήσεις παραγωγής πυκνότητας ισχύος τείνουν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα πηνία. Με πολλές σπείρες πηνία χρησιμοποιούνται σε ραδιοσυχνότητες, ενώ μιας και δύο σπειρών πηνία χρησιμοποιούνται στις χαμηλές συχνότητες. Τα σωληνοειδή πηνία σχεδιάζονται με ή χωρίς αναπόσπαστο σύστημα σβέσης και επίσης χρησιμοποιούνται στην συνεχή σκλήρυνση. Πηνία τέτοιου τύπου φαίνονται στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν.

Κανάλι ή φουρκέτα είναι το είδος πηνίου στηρίζεται στο σωληνοειδές πηνίο, μόνο που είναι επίπεδο και έχει επιμηκυνθεί. Τα περισσότερα κανάλια πηνία είναι μιας σπείρας. Αντικείμενα προς θέρμανση μπορούν να τοποθετηθούν είτε κάθετα είτε κατά μήκος του πηνίου. Όταν τα άκρα είναι κλειστά σαν καπάκια. Αυτό το είδος πηνίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμάνει δίσκους. Όταν το αντικείμενο προς εργασία τοποθετηθεί οριζόντια, τα στρογγυλά τμήματα περιστρέφονται και θερμαίνονται με στιγμιαία θέρμανση. Αντικείμενα προς θέρμανση που έχουν αιχμές, όπως λεπίδες μπορούν να ζεσταθούν με αυτά τα πηνία.



Εικόνα 3.4 Μιας σπείρας πηνίο



Εικόνα 3.5 Μιας σπείρας υψηλών
συχνοτήτων



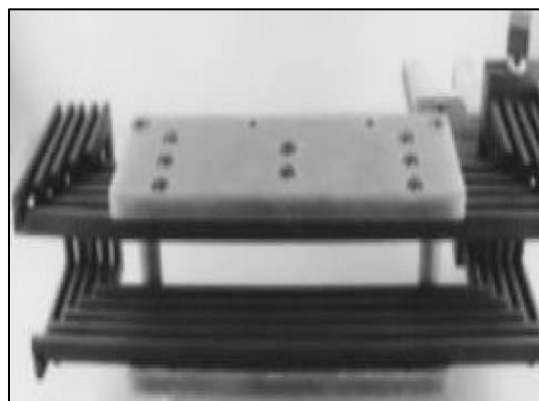
Εικόνα 3.6 Μιας σπείρας πηνίο συνεχούς θέρμανσης



Εικόνα 3.7 Πολλών σπειρών πηνίο υψηλών συχνοτήτων



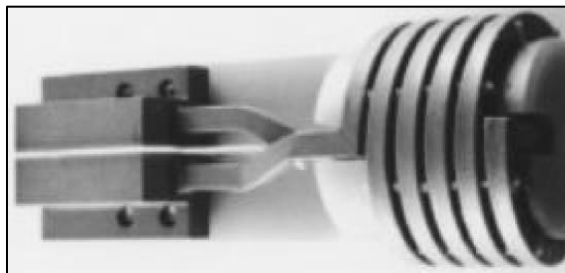
Εικόνα 3.8 Κυρτό πηνίο τύπου καναλιού



Εικόνα 3.9 Πολλών σπειρών πηνίο τύπου καναλιού



Εικόνα 3.10 Πολλών σπειρών εσωτερικό πηνίο



Εικόνα 3.11 Πολλών τετραγωνικών σπειρών εσωτερικό πηνίο

Εσωτερικά πηνία μιας ή πολλών σπειρών πηνία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την θέρμανση του εσωτερικού τμήματος του αντικειμένου προς θέρμανση. Τα πηνία αυτού του είδους τείνουν να **έχουν** τον μικρότερο συντελεστή σύζευξης, όμως η χρήση συγκεντρωτών βοηθά στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου σημαντικά.

Πηνία τηγανίτα είναι κουλουριασμένα πηνία με ένα κυκλικό τρόπο, ο οποίος μοιάζει μάτι κουζίνας και αποτελούν στρογγυλές ή ορθογώνιες επίπεδες επιφάνειες θέρμανσης. Μπορούν να ζεστάνουν τις αιχμές- άκρες ενός λεπτού δίσκου. Τα πηνία τηγανίτες μπορούν να κουλουριαστούν έτσι ώστε οι συγκεντρωμένες σπείρες να δημιουργήσουν μία απόλυτα σφαιρική διάταξη με το κέντρο του να επιμηκύνεται προς τα πάνω.

Η εικόνα 3.12 δείχνει ένα παράδειγμα πηνίου πεταλούδας. Αυτό είναι κουλουριασμένο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε, στις εξωτερικές κάθετες σπείρες, οι οποίες παράγουν την θερμότητα, η ροή ρεύματος να έχει την ίδια κατεύθυνση. Αυτό το είδος πηνίου, είναι πηνίο τύπου εγκάρσιας ροής και χρησιμοποιείται στην θέρμανση επίπεδων και λεπτών εγκάρσιων τομών.



Εικόνα 3.12 Πηνίο πεταλούδα

3.11 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΩΛΗΝΑ - ΠΗΝΙΟΥ

Δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του σωλήνα-επαγωγέα είναι οι απώλειες που αναπτύσσονται στο πηνίο εργασίας και το επιδερμικό φαινόμενο.

Απώλειες για τον σωλήνα- επαγωγέα δεν αποτελούν μονάχα οι απώλειες που αναπτύσσονται εξαιτίας της αντίστασης του ($I \times R$). Οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εφόσον η αντίσταση αυξάνεται. Το πηνίο εργασίας περιβάλλει το αντικείμενο προς θέρμανση και επομένως απορροφά ακτινοβολία και θερμική ενέργεια από το αντικείμενο προς θέρμανση, όταν αυτό θερμαίνεται. Ο σωλήνας- επαγωγέας, πρέπει να επιλεχτεί έτσι ώστε να μπορεί να αποβάλει όλη αυτή την θερμότητα που δημιουργεί τις παραπάνω απώλειες.

Το επιδερμικό φαινόμενο εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας και την ειδική αντίσταση του υλικού. Καθορίζει το πάχος του σωλήνα και το ελάχιστο πάχος σωλήνα ισοδυναμεί με το διπλάσιο του βάθους διείσδυσης. Συχνά όμως, επιλέγεται πάχος σωλήνα μικρότερο από το γινόμενο που αναφέρθηκε προηγούμενα.

Για τη διαμόρφωση Πηνίου στην κατασκευή χάλκινων πηνίων πρέπει να σημειωθεί ότι ο χαλκός σκληραίνει με την αλλαγή του σχήματος του παραμόρφωση του. Επομένως, πολύ κατασκευαστές πραγματοποιούν ανόπτηση στον σωλήνα κάθε λίγες στροφές για να εκτονώσουν αυτή την κατάσταση, με την θέρμανση του σωλήνα μέχρι να κοκκινίσει και έπειτα την γρήγορη σβέση στο νερό. Αυτή η μεσαία ανόπτηση προστατεύει τον σωλήνα από ρωγμές κατά την κατασκευή.

Σε πολλές εργασίες διαμόρφωσης πηνίου, είναι επιθυμητό το γέμισμα του πηνίου με άμμο ή αλάτι έτσι ώστε να αποκλειστεί η περίπτωση καταρροής του σωλήνα. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά κράματα με θερμοκρασία τήξης κάτω από τους 100 °C, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί για αλάτι ή άμμο. Όταν το πηνίο ολοκληρωθεί, βυθίζεται σε βραστό νερό. Το κράμα, τότε, ρέει έξω από το πηνίο και μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Με οποιαδήποτε από αυτές τις τεχνικές, ο σωλήνας δρα σαν συμπαγή ράβδο κατά την διαμόρφωση και μπορεί απλά να καθαριστεί έπειτα.

3.12 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ο βαθμός απόδοσης σε ένα Σύστημα Επαγωγικής Θέρμανσης καθορίζεται από τα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν. Τον αντιστροφέα, το σύστημα σύνδεσης, το κύκλωμα συντονισμού, το πηνίο εργασίας, το αντικείμενο προς θέρμανση και το σύστημα ψύξης. Το κάθε ένα από τα παραπάνω επηρεάζει και διαμορφώνει το ποσό ενέργειας που τελικά θα μεταφερθεί στο αντικείμενο προς θέρμανση.

Για παράδειγμα, το είδος των ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στον αντιστροφέα, εκτός από το εύρος λειτουργίας, επηρεάζει και τον βαθμό απόδοσης ή ικανότητα του συστήματος επαγωγικής θέρμανσης. Πχ οι αντιστροφείς με θυρήστορ έχουν απόδοση 90% έως 97%, οι αντιστροφείς με τρανζίστορ 75% έως 90% και οι αντιστροφείς με καθοδικό σωλήνα απόδοση 55% έως 70%. Ευτυχώς, στις μέρες μας, η χρήση των Mosfet και των IGBT μας προσφέρει σχεδόν 100% απόδοση.

Τόσο το σύστημα σύνδεσης (matching system), όσο και το κύκλωμα συντονισμού (tuning system), εισάγουν απώλειες, καθώς τα παθητικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται περιέχουν αντιστάσεις. Επίσης, αν ο λόγος του Μ/ΣΧ δεν παράγει ακριβώς την επιθυμητή τιμή ρεύματος και οι τιμές πηνίων και πυκνωτών είναι διαφορετικές- λόγω τυποποίησης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ισχύς εξόδου της διάταξης δεν θα είναι αυτή που

προσδοκείται.

Ο βαθμός απόδοσης κατά την Επαγωγική Διαδικασία καθορίζεται από δύο επιμέρους παράγοντες, την ικανότητα σύζευξης και την ηλεκτρική ικανότητα του συστήματος. Η πρώτη ορίζεται ως:

$$n = \frac{1}{1 + \sqrt{l_c / (p_w * \mu_w)}} \quad (3.1)$$

Όπου

l_c : η ειδική αντίσταση του πηνίου εργασίας ($\Omega \text{ m}$).

p_w : η ειδική αντίσταση του αντικείμενου προς θέρμανση ($\Omega \text{ m}$).

μ_w : η μαγνητική διαπερατότητα του αντικείμενου προς θέρμανση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο προς θέρμανση είναι από χάλυβα, για το λόγο αυτό, παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για το τι είναι χάλυβας, πως κατηγοριοποιείται, τυποποιήσεις και θερμική επεξεργασία του χάλυβα. Βέβαια, σημειώνεται για άλλη μια φορά, ότι σε μια εμπορική κατασκευή επαγωγικής διάταξης απαιτείται πιο λεπτομερή αναφορά στις παραμέτρους που πλαισιώνουν το εκάστοτε δοκίμιο.

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΑ

Ο χάλυβας (κοινώς ασάλι) είναι κράμα σιδήρου– άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

4.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

1 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Περιέχουν έως 1,0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0,05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα. Οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

1.1 χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steels· C < 0,30%),

- 1.2 χάλυβες μέτριου άνθρακα (medium carbon steels· 0,30% < C < 0,60%),
 - 1.3 χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels· 0,60% < C < 1,00%), και
 - 1.4 χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels· 1,00% < C < 2,00%)
- 2 Κραματωμένοι χάλυβες:
- 2.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
 - 2.2 Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
 - 2.3 Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Martensing) με μεγάλα ποσοστά βολφράμιου (W), βανάδιου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρώμιου (Cr), νικέλιου (Ni) και κοβάλτιου (Co).

Όσον αφορά την περαιτέρω επεξεργασία τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

- 1 Χάλυβες διαμόρφωσης. Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).
- 2 Χυτοχάλυβες. Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή «χελωνών».

Όσον αφορά την τελική τους χρήση οι χάλυβες διακρίνονται σε :

1. Χάλυβες κατασκευών. Είναι χάλυβες με μικρά, σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ.
2. Ανοξείδωτοι χάλυβες. Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσεως, όπως π.χ. είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κ.λπ.
3. Εργαλειοχάλυβες. Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόρνου, φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).

4. Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών, κ.λπ.

4.4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης το γερμανικό DIN, το γαλλικό ANFOR, το αγγλικό BS, το αμερικάνικο AISI- SAE. Το 1995 συντάχθηκε για πρώτη φορά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10020 (Πίνακας 4.1), Τυποποίησης Σιδήρου και Χάλυβα και αναθεωρήθηκε το 2000. Διεθνή πρότυπα είναι τα ISO 4948-1 και ISO 4948-2. Η τυποποίηση στηρίζεται στην χημική σύσταση, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την χρήση για την οποία προορίζονται. Τα πιο συνήθη συστήματα είναι το γερμανικό DIN και το αμερικάνικο AISI.

Πίνακας 1 Τυποποίηση χαλύβων (ενδεικτικός πίνακας)

| Τύπος Χάλυβα | Συστήματα Τυποποίησης | | | | | Ονομαστική σύσταση % | | | | | |
|---|-----------------------|------|--------------|------|-----------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| | AISI | BS | DIN | SS | ISO 4957 | C | v | Mo | W | V | Άλλα |
| Καθαρός ανθρακούχος χάλυβας | W1 | BW1 | C100W1 | 1880 | - | 1.0 | - | - | - | - | - |
| Χαμηλήςκραμάτωσηςψυχρήςκατεργασίαςχάλυβας | O1 | BO1 | 105WCrV | 2510 | 100MnCrW4 | 0.95 | 0.5 | - | 0.5 | - | 1.2M |
| Χαμ. κραμάτωσης θερμής και ψυχρήςκατεργασίαςχάλυβας | S1 | BS1 | 45WCrV7 | 2730 | - | 0.5 | 1.2 | 0.3 | 2.4 | | 1.0Si |
| Υψηλής κραμάτωσης ψυχρήςκατεργασίαςχάλυβας | D3 | BD3 | X210Cr12 | - | 210 Cr 12 | 2.0 | 12 | - | - | - | - |
| Θερμήςκατεργασίαςχάλυβας | H13 | BH13 | X40(rMoV51) | 2242 | 40CrMoV5 | 0.4 | 5.3 | 1.4 | - | 1.0 | |
| Μεγάλης ταχύτηταςχάλυβας | T1 | BT1 | S18-0-1(B18) | - | HS 18-0-1 | 0.75 | 4.0 | - | 18 | 1.0 | - |

4.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΡΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Αντικείμενο προς θέρμανση ή δοκίμιο (work piece στην αγγλική βιβλιογραφία) ονομάζεται, όπως υπονοεί η ονομασία του, το υλικό ή γενικότερα το αντικείμενο το οποίο πρόκειται να θερμανθεί.

Το αντικείμενο προς θέρμανση και η επεξεργασία στην οποία θα υποβληθεί, είναι η αιτία δημιουργίας της Επαγωγικής Διάταξης και της προσαρμογής της έτσι ώστε να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις που αφορούν την επεξεργασία του.

Σε ένα τυποποιημένο, ποιοτικό σύστημα δεν είναι αναγκαία μόνο η κατανόηση των απαιτήσεων του «αντικείμενου προς θέρμανση» ή ο τρόπος θέρμανσης του. Είναι απαραίτητη η γνώση του υλικού- αντικείμενου προς θέρμανση όσο και η οποιαδήποτε επεξεργασία έχει δεχθεί πριν την Επαγωγική Θέρμανση. Η επιλογή λάθος υλικού ή η έλλειψη πληροφοριών σχετικά με οποιαδήποτε επεξεργασία του κατά το παρελθόν, μπορεί να εμποδίσει την διαδικασία της Επαγωγής. Βέβαια, στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν είναι εφικτή η εκτενής ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του αντικείμενου και της προγενέστερης επεξεργασίας του. Γίνεται αναφορά σε όσα είναι άκρως απαραίτητα για τον σχεδιασμό της Επαγωγικής Διάταξης.

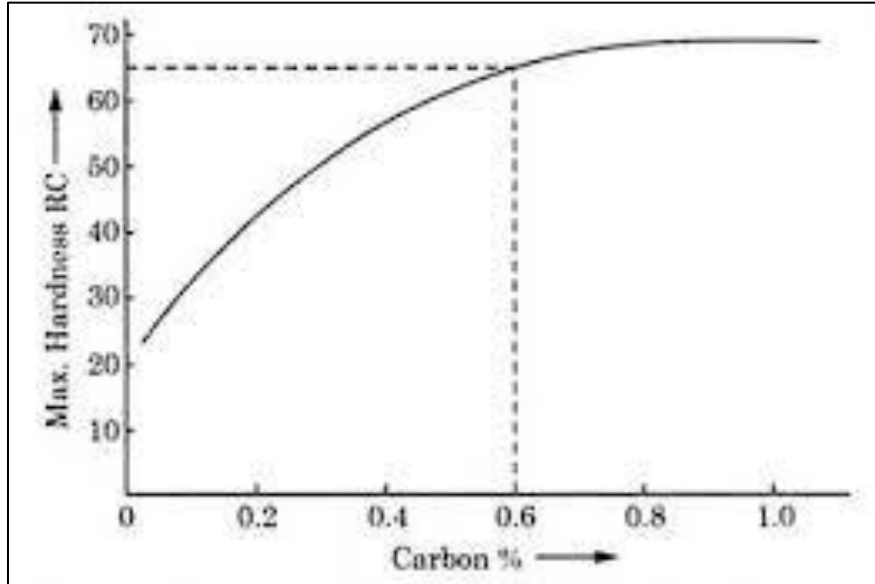
4.6 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ

Οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες έχουν ως στόχο τη βελτίωση (σκλήρυνση) της επιφάνειας των χαλύβων, διατηρώντας την ολκιμότητα του εσωτερικού. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις κατεργασίες εργαλείων και καλουπιών διαμόρφωσης, σε εξαρτήματα εδράνων και ολισθητήρων, σε οδοντωτούς τροχούς και σε εξαρτήματα αυτοκινήτων (π.χ. εκκεντροφόρος άξονας), όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται και υψηλή δυσθραυστότητα.

Παρακάτω, γίνεται μια τυπική αναφορά στις πιο συνηθισμένες επιφανειακές κατεργασίες. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην Επαγωγική Σκλήρυνση διότι αποτελεί πρακτική εφαρμογή της Επαγωγικής Θέρμανσης.

Οι πιο καθιερωμένες βιομηχανικές επιφανειακές κατεργασίες είναι οι ακόλουθες:

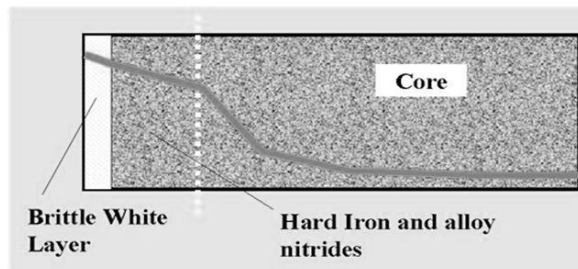
- Ενανθράκωση (εμπλουτισμός σε άνθρακα της επιφάνειας μαλακού χάλυβα (0.10-0.25%C)) όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.1.
- Εναζώτωση (εμπλουτισμός της επιφάνειας του χάλυβα με άζωτο, που επιτυγχάνεται με θέρμανση στους 500°C) όπως αποτυπώνεται στην εικόνα
-



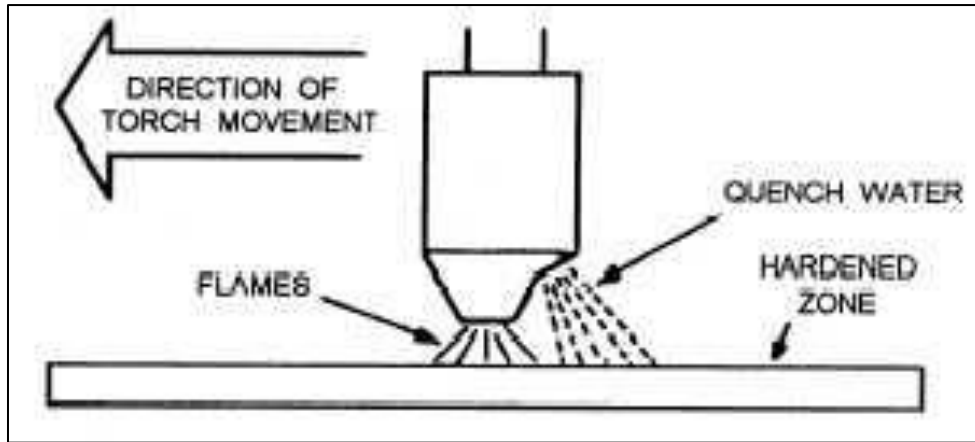
Εικόνα 4.1 Περιεκτικότητα άνθρακα συναρτήσει σκληρότητας

Nitriding

- saturation with nitrogen $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons 2\text{N} + 3\text{H}_2$
- nitriding temperature: 500 – 600°C
- typical nitriding case depth 0,5 mm.
- time of process: 0,3mm - 20 hours, 0,5 mm – 60 hours
- hardness of the layer may exceed 1000 HV.
- steel must contain chemical element creating nitrides (Al, Cr, Mo, V).

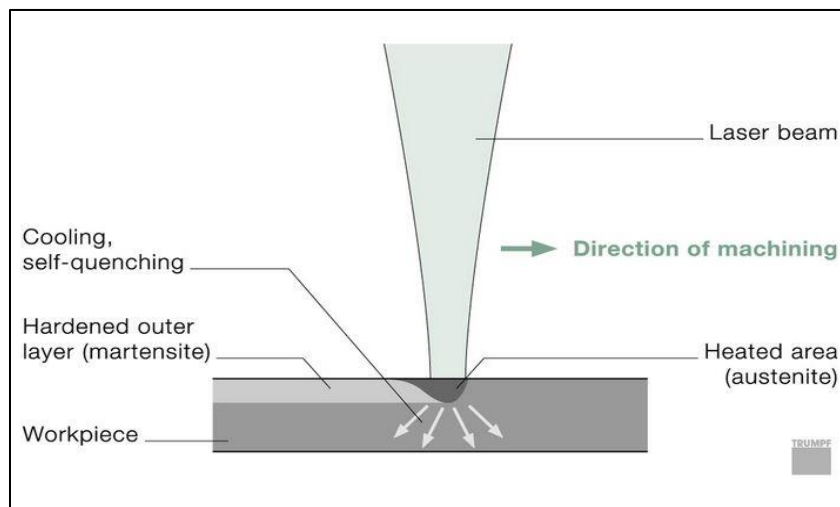


Εικόνα 4.2 Επιφάνεια χάλυβα ο οποίος έχει υποστεί εναζώτωση



Εικόνα 4.3 Επιφανειακή βαφή με φλογοβαφή

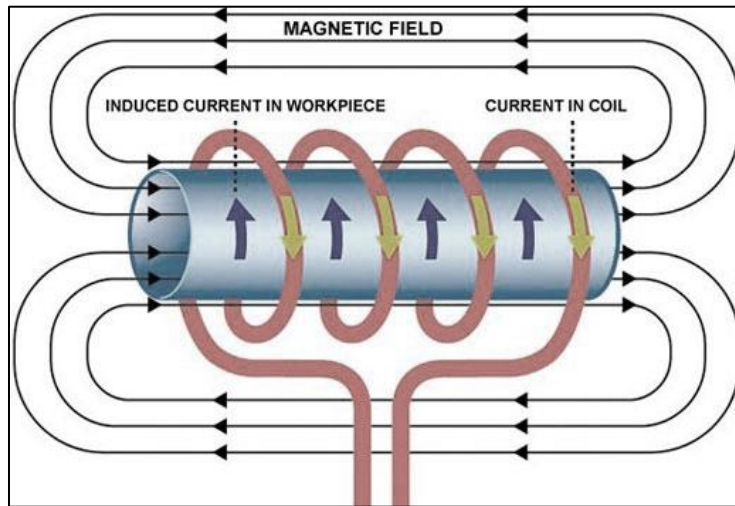
- Φλογοβαφή (με τη βοήθεια φλόγας, που δημιουργείται από καύση μείγματος καυσίμου – οξυγόνου) όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 4.3.
- Επιφανειακή βαφή με δέσμη LASER (δέσμη laser υψηλής πυκνότητας ισχύος (περίπου $106\text{W}/\text{cm}^2$) και στη συνέχεια ψύχεται στον αέρα) όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 Επιφανειακή βαφή με laser

4.7 ΡΕΥΜΑΤΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΠΡΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Στην Ε. Θ η δημιουργία θερμότητας στηρίζεται στις Απώλειες Joule σαν αποτέλεσμα των δινορευμάτων. Στο πηνίο εργασίας εφαρμόζεται υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο παράγει εναλλασσόμενη μαγνητική ροή (πεδίο), η οποία με την σειρά της προκαλεί εναλλασσόμενη τάση ίδιας συχνότητας μέσα στο αντικείμενο προς θέρμανση (work piece). Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz την στιγμή που μεταβάλλεται η μαγνητική ροή προκαλούνται δινορευματα τα οποία δημιουργούν μαγνητική ροή, αντίθετης κατεύθυνσης από αυτή του πηνίου εργασίας (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5 Απεικόνιση ρευμάτων

Τα δινορευματα ρέουν μέσα στο αντικείμενο προς θέρμανση- ρέουν στην αντίσταση του αντικειμένου προς θέρμανση και αναπτύσσεται θερμότητα. Τέλος, επειδή η θερμότητα προκαλείται από επαγωγικά ρεύματα, η διαδικασία αυτού του είδους θέρμανσης ονομάζεται Επαγωγική Θέρμανση.

Η βασική θεωρία της Ε. Θ είναι παρόμοια με αυτή των Μετασχηματιστών. Το πηνίο εργασίας αποτελεί το πρωτεύον και το υπό θέρμανση αντικείμενο το δευτερεύον. Οπότε, πολλά από τα χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών είναι χρήσιμα στην ανάπτυξη των επιμέρους στοιχείων της Ε. Θ. (πχ του πηνίου εργασίας). Τα πιο βασικά είναι τα εξής:

- Η ικανότητα σύζευξης μεταξύ των τυλιγμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.

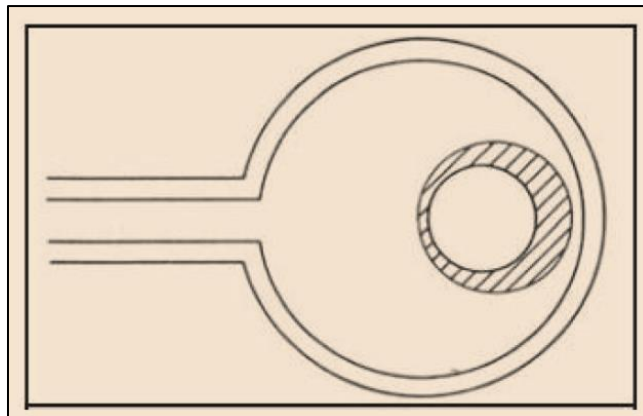
- Το ρεύμα στο πρωτεύον πολλαπλασιασμένο από τον αριθμό σπειρών στο πρωτεύον είναι ίσο με το γινόμενο του ρεύματος στο δευτερεύον επί τον αριθμό των σπειρών στο δευτερεύον τύλιγμα.

•Οι απώλειες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος οφείλονται στις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων τους και στην σταθερά σύζευξης μεταξύ τους.

Το δευτερεύον τύλιγμα- αντικείμενο προς θέρμανση αποτελείται από μια σπείρα (από πολλούς θεωρείται βραχυκυκλωμένο) και υπάρχουν σημαντικές θερμικές απώλειες εξαιτίας της αύξησης του ρεύματος φορτίου.

4.8 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΟΥ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ

Ο σχεδιασμός των άκρων (leads) του πηνίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται καλή σύζευξη. Στο σημείο όπου τα άκρα και το πηνίο ενώνονται το μαγνητικό πεδίο είναι πιο αδύναμο. Άρα, το μαγνητικό κέντρο του επαγωγέα- πηνίου δεν σημαίνει ότι ταυτίζεται πάντα με το γεωμετρικό του κέντρο. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα πηνία μιας σπείρας. Καθώς, ο αριθμός των σπειρών αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο από κάθε σπείρα προστίθεται, το φαινόμενο αυτό γίνεται λιγότερο σημαντικό. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, πολλές φορές τοποθετείται το αντικείμενο προς θέρμανση όχι ακριβώς στο κέντρο (Εικόνα 4.6). Σε πολλές εφαρμογές για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη θέρμανση το αντικείμενο προς θέρμανση περιστρέφεται.



Εικόνα 4.6 Αντικείμενο τοποθετημένο παρακεντρα στο πηνίο

Το πηνίο εργασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην αναιρεί την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ τους δημιουργείται επαγωγή, οπότε αν τοποθετήσουμε αγώγιμο υλικό στο εσωτερικό του πηνίου θα ζεσταθεί. Το πηνίο στα δεξιά παρέχει επιπρόσθετη επαγωγή και είναι πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα καλού πηνίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

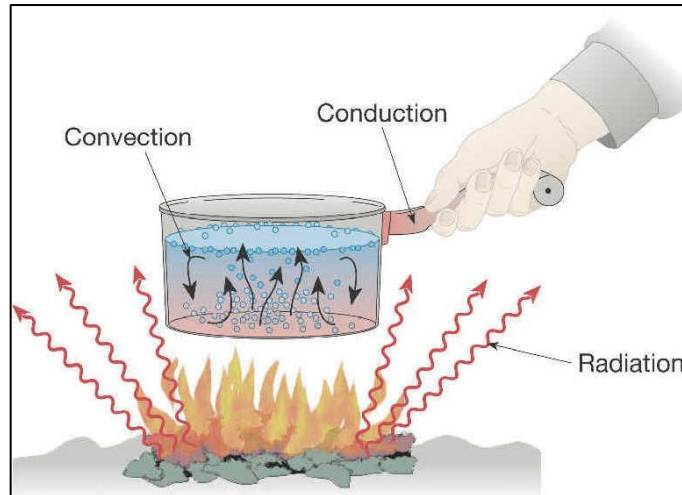
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τη λέξη θερμότητα την χρησιμοποιούμε όταν περιγράφουμε την μεταφορά ενέργειας από ένα σημείο στο άλλο. Με άλλα λόγια, η ροή θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας που συντελείται μόνο όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας. Ενώ εσωτερική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει μία ουσία λόγω της θερμοκρασίας της. Η εσωτερική ενέργεια ενός υλικού σχετίζεται με την εσωτερική κίνηση των ατόμων και των μορίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση των ατόμων και των μορίων σε ένα υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του υλικού.

Πολλές φορές σε ένα υλικό η θερμοκρασία δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη. Όταν σε ένα υλικό δεν υπάρχει ομοιόμορφη θέρμανση γίνεται αυθόρμητα μια προσπάθεια η αυτή η διαφορά θερμοκρασίας να εξαλειφθεί και να αποκτήσει ίδια θερμοκρασία σε όλο το μήκος του. Διαφορά θερμοκρασίας σε ένα υλικό σημαίνει άνιση κατανομή της ενθαλπίας (ολική ενέργεια του συστήματος όταν βρίσκεται υπό σταθερή πίεση) και η δημιουργία ίδιας θερμοκρασίας στο σύνολο του υλικού σημαίνει αναδιανομή της ενέργειας.

5.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί (Εικόνα 5.1) με τους οποίους πραγματοποιείται αυτή μεταφορά ενέργειας. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε ακίνητο μέσο (στερεό, υγρό ή αέριο) και ονομάζεται **αγωγή (conduction)**. Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται σε μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού και ονομάζεται **συναγωγή (convection)**. Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας, χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, με την εφαρμογή του τρίτου μηχανισμού, της **θερμικής ακτινοβολίας (thermal radiation)**.



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση των τριών μορφών μεταφοράς θερμότητας

5.1.1. Συναγωγή

Η συναγωγή αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού.

Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια, που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού. Η συναγωγή συμβαίνει στα υγρά με την θερμότητα να ρέει από το πιο θερμό μέρος του υγρού στο πιο ψυχρό ή μέσω της επαφής του υγρού με άλλα σώματα.

Η ροή θερμότητας που μεταφέρεται με συναγωγή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας που γίνεται ανταλλαγή θερμότητας, την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών και τις ιδιότητες του υγρού.

Η εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία της συναγωγής είναι η εξής:

$$Q = \Delta T \times \alpha \times A \quad (5.1)$$

5.1.2. Αγωγή

Η αγωγή θερμότητας αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα (στερεά ή ρευστά σε ακινησία) και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από στοιχειώδη σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής αποτελεί τον κύριο μηχανισμό θέρμανσης για συμπαγή υλικά. Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμαντικού στοιχείου, η αγωγιμότητα εξαρτάται από την αγωγή θερμότητας (conductivity) λ και την διαφορά θερμοκρασίας ΔT μεταξύ των δύο μερών (στοιχείου και αντικειμένου θέρμανσης). Η ροή θερμότητας που προκύπτει από την αγωγή είναι:

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (5.2)$$

Όπου:

- L: το μήκος του επαγωγού (m).
- A: η διατομή του επαγωγού

5.1.3. Ακτινοβολία

Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από 0 K, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους άλλους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιείται και εν κενώ (στην πραγματικότητα η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται πιο αποδοτικά εν κενώ). Στον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία η σχέση που δίνει την ροή θερμότητας είναι η εξής:

$$Q = A \times \varepsilon \times \sigma \times T \quad (5.3)$$

Όπου:

- T: θερμοκρασία (°C).
- A: η διατομή της επιφάνειας επαφής (m^2).
- ε : σταθερά Stefan- Boltzann.
- ε : ικανότητα εκπομπής.

5.3 ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Οι ιδιότητες της ύλης, που συνδέονται με τη μετάδοση θερμότητας, συνήθως χαρακτηρίζονται ως θερμοφυσικές ιδιότητες. Αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς. Στην πρώτη κατηγορία συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , που συνδέεται με την αγωγή θερμότητας και η κινηματική συνεκτικότητα ν , που συνδέεται με τη συναγωγή θερμότητας.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δίνει μια ένδειξη του ρυθμού με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται εντός της ύλης. Αφού η αγωγή θερμότητας πραγματοποιείται σε ατομικό επίπεδο, μέσω των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θα εξαρτάται από τη μοριακή δομή του σώματος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ορίζεται από το Νόμο του Fourier ως:

$$\kappa = dQ \frac{\partial n}{dA \cdot \partial T} \quad (5.4)$$

Όπου:

- κ = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- dQ = στοιχειώδη ποσό θερμότητας
- dA = στοιχειώδης επιφάνεια
- $\partial T/\partial n$ = βαθμίδα θερμοκρασίας

Αφού ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη μοριακή δομή του σώματος θα μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα σε σώματα διαφορετικής φάσης. Στα στερεά, όπου οι διαμοριακές αλληλεπιδράσεις είναι πολύ ισχυρές, περιμένουμε μεγάλες τιμές του συντελεστή. Μικρότερες τιμές αναμένουμε να παίρνει στην περίπτωση των υγρών, ενώ στα αέρια, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων και των ατόμων είναι σχετικά πολύ ασθενείς, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας θα παίρνει τις μικρότερες τιμές.

Στα στερεά σώματα η μετάδοση θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται μέσω δύο μηχανισμών. Ο πρώτος συνδέεται με τη διάδοση κυμάτων στην κρυσταλλική δομή, ενώ ο δεύτερος συνδέεται με τη μετακίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Στα μη μεταλλικά υλικά ο πρώτος όρος είναι ο κυρίαρχος. Στην περίπτωση των κρυσταλλικών υλικών, η διάδοση των κυμάτων είναι πιο εύκολη, από την περίπτωση των άμορφων σωμάτων, οπότε ο

συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας παίρνει μεγαλύτερες τιμές για κρυσταλλικά υλικά. Ειδικά για μερικά κρυσταλλικά μη μεταλλικά υλικά όπως το διαμάντι, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να ξεπεράσει την τιμή μεταλλικών υλικών. Στα μεταλλικά υλικά κυρίαρχος όρος είναι αυτός που συνδέεται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μεταλλικού δεσμού. Ο συγκεκριμένος όρος είναι ανάλογος της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μετάλλου, ή αντίστοιχα αντιστρόφως ανάλογος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μετάλλου. Οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα στερεά, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, η δε μεταβολή τους εξαρτάται από το σώμα και τη δομή του.

5.4 ΕΞΙΣΩΣΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑΣ - ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Όταν σε ένα σώμα προσφέρεται θερμότητα, η θερμοκρασία του κατά κανόνα αυξάνεται, με εξαίρεση ειδικών περιπτώσεων όπως η τήξη ή ο βρασμός.

Σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας, για να θερμανθεί κατά ΔT ένα σώμα που έχει μάζα m , πρέπει να πάρει ποσότητα θερμότητας ΔQ τόση, ώστε να ισχύει η εξίσωση:

$$\Delta Q = c \times m \times \Delta T (J) \quad (5.5)$$

Όπου:

- c : η ειδική θερμότητα του σώματος, χαρακτηριστικό της ύλης από την οποία συνίσταται το σώμα, μετράται σε J/kg K.

Ορίζεται σαν ειδική θερμότητα υλικού μάζας m , το ποσό θερμότητας που απαιτεί η μονάδα μάζας του σώματος (κιλό, kg) για την αύξηση της θερμοκρασίας του κατά ένα βαθμό (K). Η ποσότητα $m \cdot c$ (= C) καλείται θερμοχωρητικότητα και μετράται σε J/K. Η θερμοχωρητικότητα χρησιμοποιείται κατά την αναφορά σε σύστημα ολόκληρης μάζας. Σημειώνεται ότι η θερμοχωρητικότητα δύο άνισων μαζών του ίδιου σώματος διαφέρει ενώ η ειδική θερμότητά τους είναι η ίδια. Παραδείγματα ειδικών θερμοτήτων υλικών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Θερμοχωρητικότητα υλικών

| Υλικό | c (J/kgK) | Υλικό | c (J/kgK) |
|------------|-----------|------------|-----------|
| Αργίλιο | 908 | Οινόπνευμα | 2428 |
| Έδαφος | 921 | Πάγος | 2093 |
| Κασσίτερος | 226 | Πετρέλαιο | 2135 |
| Μόλυβδος | 130 | Σίδηρος | 460 |
| Νερό | 4186 | Χαλκός | 381 |

5.5 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ

Η απόδοση θερμικής ενέργειας εξαρτάται από την ικανότητα μετάδοσης θερμότητας του θερμικού στοιχείου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το στοιχείο θέρμανσης θερμαίνει το υλικό ή προϊόν με ένα από τους παραπάνω μηχανισμούς ή συνδυασμό αυτών. Κατά την μετάδοση όμως της θερμότητας προς το αντικείμενο προς θέρμανση υπάρχουν απώλειες. Απώλειες, επίσης, παρατηρούνται κατά την θέρμανση του στοιχείου θέρμανσης από την πηγή. Όλες αυτές οι απώλειες πρέπει να ληφθούν υπόψη για να φτάσει στο αντικείμενο προς θέρμανση το επιθυμητό ποσό θερμότητας. Σε διαφορετική περίπτωση, η ποσότητα θερμότητας που θα προσδοθεί στο αντικείμενο προς θέρμανση θα είναι μικρότερη και η επιθυμητή θερμοκρασία δεν θα επιτευχθεί.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η ολική ενέργεια θα δίδεται από την σχέση:

$$W = Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5.6)$$

Όπου:

- Q_1 : η ενέργεια που καταλήγει στο αντικείμενο θέρμανσης.
- Q_2 : η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταφορά θερμότητας από το στοιχείο θέρμανσης στο αντικείμενο προς θέρμανση.
- Q_3 : η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταφορά θερμότητας από την πηγή στο αντικείμενο προς θέρμανση.

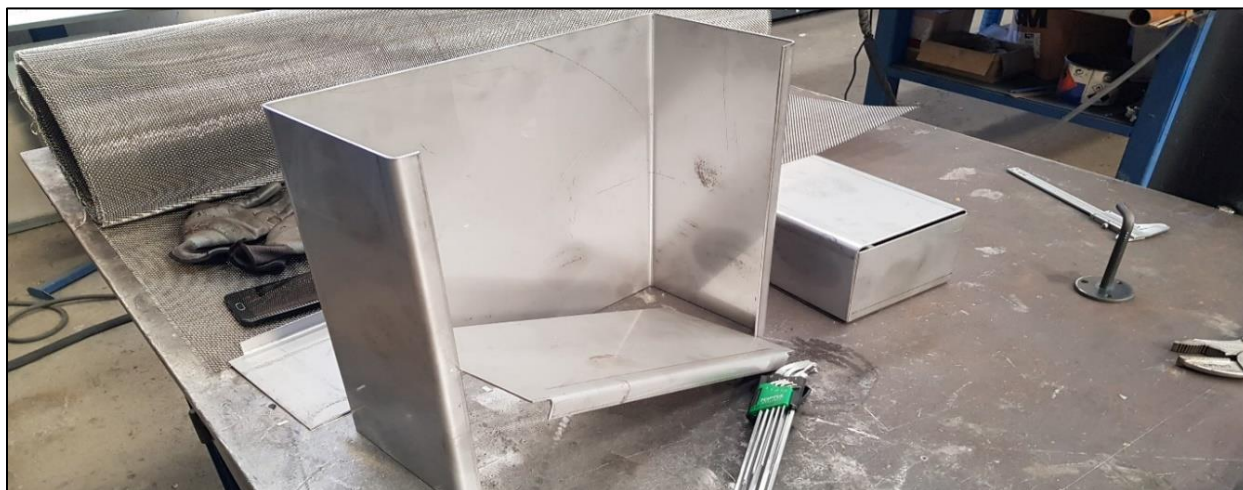
Συνεπώς η Ικανότητα ενεργειακής απολαβής δίδεται από την σχέση:

$$n = Q_1 / Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5.7)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σχέδιο της πειραματικής διάταξης είχε αρκετές αλλαγές κατά τη διάρκεια της υλοποίησής της με σκοπό τη βελτίωσή της. Στις εικόνες 6.1-6.7 παρουσιάζονται στάδια δημιουργίας της διάταξης μέχρι την τελική της μορφή. Στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου γίνεται μια εκτενείς αναφορά σε κάποια πιο ιδιαίτερα μέρη της κατασκευής.



Εικόνα 6.1 Υλικά για τη δημιουργία της διάταξης



Εικόνα 6.2 Επεξεργασία κουτιού της διάταξης



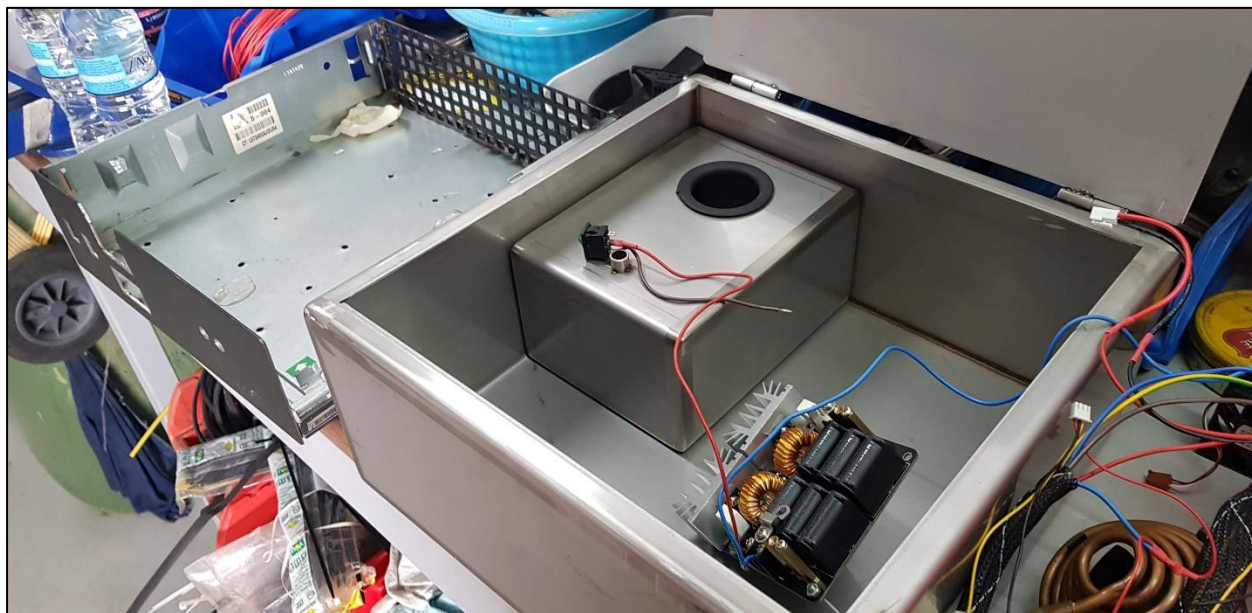
Εικόνα 6.3 Επεξεργασία αρχικού κουτιού της διάταξης



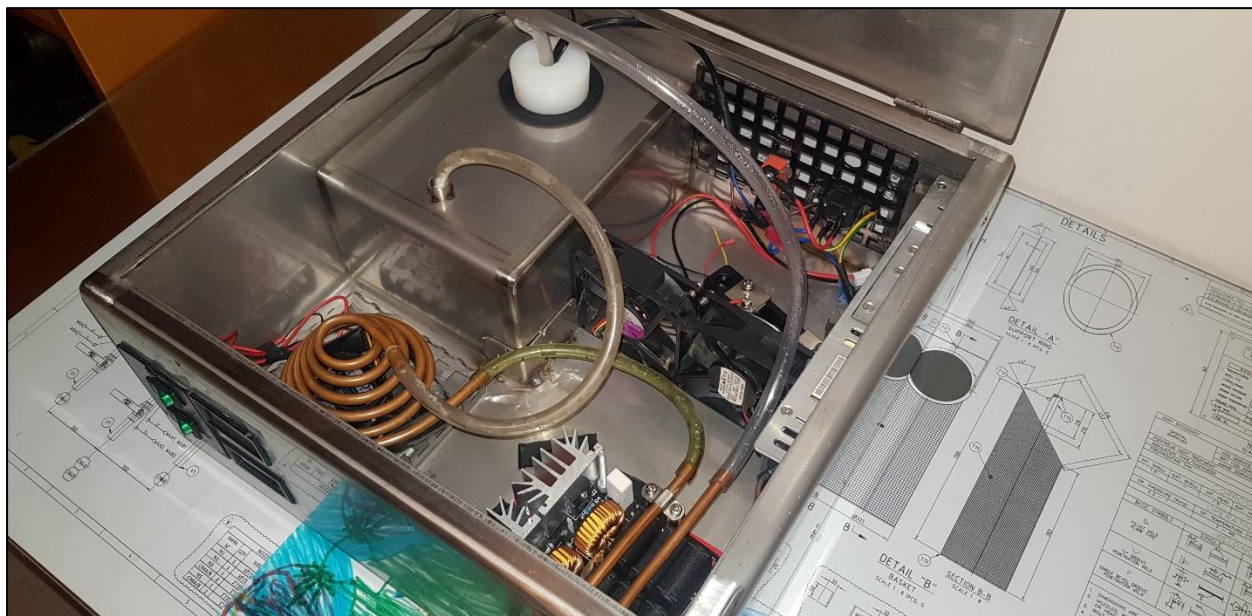
Εικόνα 6.3 Επεξεργασία αρχικού κουτιού της διάταξης



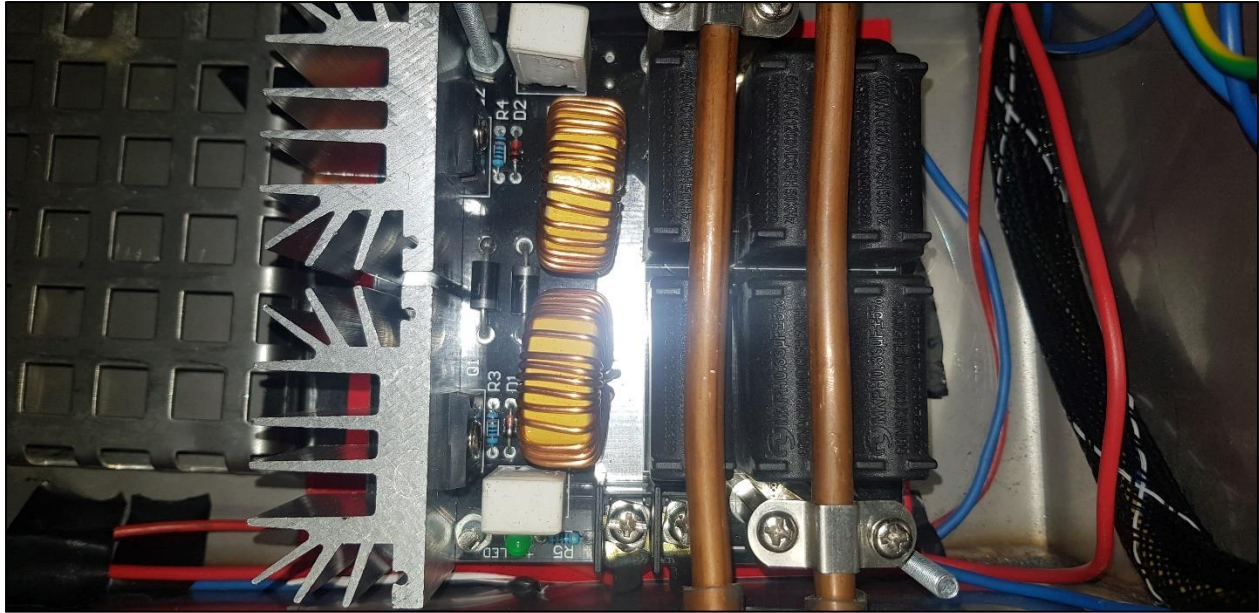
Εικόνα 6.4 Αρχικό κουτί διάταξης



Εικόνα 6.5 Σύνδεση εσωτερικών εξαρτημάτων



Εικόνα 6.6 Εσωτερικό μέρος της διάταξης



Εικόνα 6.7 Εσωτερικό μέρος της διάταξης

6.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΨΥΞΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής δημιουργεί διαφορές δυναμικού στο υλικά. Για τον λόγο αυτό στο πηνίο δημιουργούνται απώλειες λόγω δινορευμάτων οι οποίες μετατρέπονται σε θερμότητα. Για να κρατήσουμε χαμηλά τη θερμοκρασία του πηνίου ώστε να μην καταστραφεί, δημιουργήθηκε ένα κλειστό σύστημα ψύξης. Το σύστημα ψύξης λειτουργεί παρέχοντας νερό μέσα από το πηνίο με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο και να απορροφά την θερμότητα. Από την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, είναι δυνατό να υπολογιστούν και οι θερμικές απώλειες επάνω στο πηνίο.

Η διάταξη αποτελείται από ένα δοχείο (εικόνα 6.8), το οποίο είναι θερμικά μονωμένο και λειτουργεί ως δεξαμενή του ψυκτικού μέσου. Στο δοχείο επίσης έχει τοποθετηθεί ένα ψηφιακό θερμόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα τοποθετήθηκε μια αντλία η οποία έχει σκοπό να κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο στο κύκλωμα του πηνίου. Έπειτα το νερό διοχετεύεται μέχρι το πηνίο μέσω σωλήνων μικρής διαμέτρου που στις άκρες τους έχουν τοποθετηθεί ρακόρ για να είναι εφικτή η εναλλαγή πηνίων.



Εικόνα 6.8 Δοχείο-δεξαμενή ψυκτικού υγρού

6.2.1. Αντλία κυκλοφορίας νερού

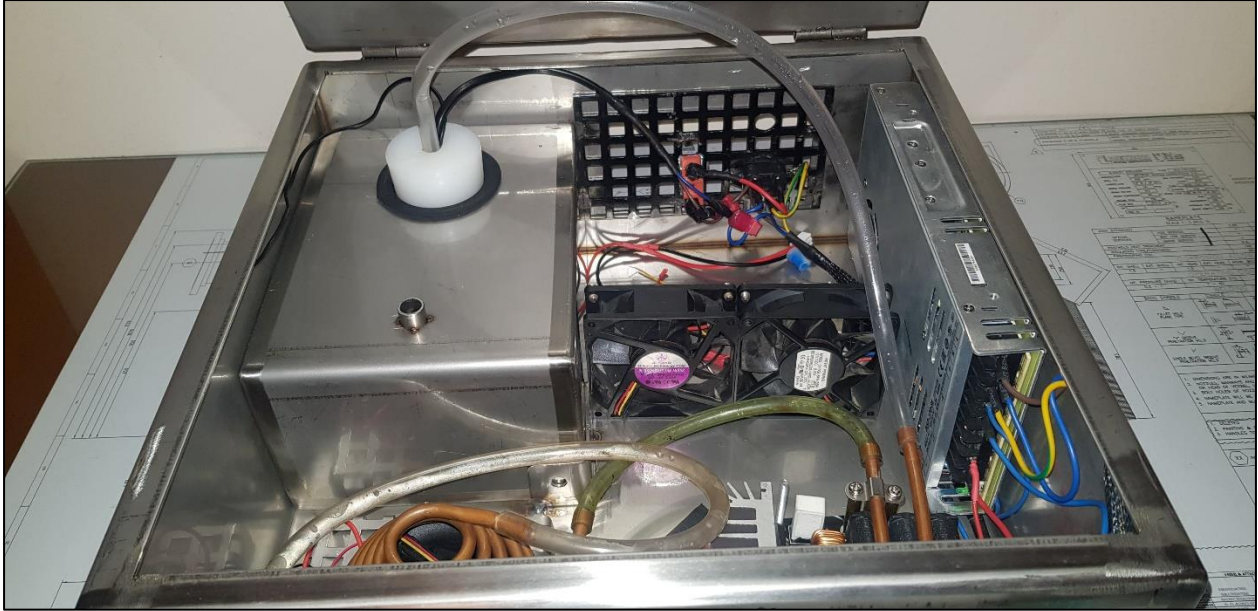
Για την παροχή νερού στο κύκλωμα ψύξης χρησιμοποιήθηκε αντλία (εικόνα 6.9) μικρής παροχής και ισχύος. Η επιλογή αυτή αρχικά έγινε, γιατί οι θερμικές απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας μέσω της κυκλοφορίας του νερού δεν είναι μεγάλες, ο όγκος που καταλαμβάνει είναι μικρός και μπορείς να τοποθετηθεί στο δοχείο νερού και επίσης δεν επιβαρύνει την συνολική ισχύ της συσκευής καθώς είναι μόλις 3 Watt.



Εικόνα 6.9 Αντλία νερού μικρής ισχύος

6.2.2. Σωλήνες κυκλοφορίας νερού

Τα σωληνάκια (εικόνα 6.10) που χρησιμοποιήθηκαν είναι θερμικά μονωμένα έτσι ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας. Όπως προαναφέρθηκε πριν στις άκρες από τα σωληνάκια τοποθετηθήκαν ρεκόρ για την εναλλαγή του πηνίου. Το υλικό κατασκευής από τα ρακόρ είναι ορείχαλκος για να μην δημιουργούν υστέρηση στο κύκλωμα του πηνίου.



Εικόνα 6.10 Εσωτερικό διάταξης/Εσωτερικά σωληνάκια

6.2.3. Ψηφιακό θερμόμετρο

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού στο δοχείο χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο (εικόνα 6.11). Επειδή ο χρόνος των πειραματικών μετρήσεων είναι της τάξης του 1 λεπτού είναι σημαντικό ο χρόνος απόκρισης του θερμομέτρου να είναι σχετικά μικρός (<1 sec) για να μπορεί να αποκρίνεται στα μεταβατικά φαινόμενα.



Εικόνα 6.11 Ψηφιακό θερμόμετρο τοποθετημένο στο πάνελ ελέγχου

6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Πριν ξεκινήσουν οι πειραματικές μετρήσεις (εικόνα 6.12), απαιτείται η προετοιμασία της πειραματικής διάταξης με συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά τοποθετήσαμε στα ρεκόρ το υπό μελέτη πηνίο (πηνίο 7 σπειρών (εικόνα 6.13) εσωτερικής διαμέτρου 50mm, μήκος 80mm, κενό μεταξύ των σπειρών 10mm) και γίνεται επαρκής σύσφιξη για αποφυγή ανεπιθύμητων αντιστάσεων. Στη συνέχεια, γεμίζεται η δεξαμενή με συγκεκριμένη ποσότητα νερού (500 ml) και ενεργοποιείται η αντλία νερού για 5 λεπτά έτσι ώστε να γεμίσει το κύκλωμα και να γίνει η απαραίτητη εξαέρωση. Ο χρόνος των πειραμάτων ξεκινάει από τη στιγμή που ενεργοποιείται ο διακόπτης που τροφοδοτεί την γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων (εικόνα 6.14). Η διάρκεια των πειραμάτων ποικίλει από 60 έως και 300 δευτερόλεπτα. Κατά την διάρκεια λειτουργίας, πραγματοποιούνται μετρήσεις τάσης εισόδου, ρεύματος εισόδου και θερμοκρασίας νερού ανά 10 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας του πρώτου λεπτού λειτουργίας (από την ενεργοποίηση της γεννήτριας υψηλών συχνοτήτων) συνεχίζονται οι μετρήσεις ανά 10 δευτερόλεπτα για όσο χρονικό διάστημα παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό γίνεται για τον λόγο ότι πρέπει να αφήσουμε λίγο χρόνο στο νερό να απορροφήσει την θερμότητα που άγεται. Μόλις διαπιστωθεί μείωση της θερμοκρασίας, απενεργοποιείται η αντλία νερού και ολοκληρώνεται το πείραμα. Με την ίδια ακριβώς διαδικασία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικά πηνία και για διαφορετικά φορτία. Για την επίτευξη επαναληψιμότητας στα αποτελέσματα, το πείραμα επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.



Εικόνα 6.12 Συσσκευή



Εικόνα 6.13 Πηνίο 7 σπειρών με συνδέσμους ρακόρ.



Εικόνα 6.14 Διακόπτης λειτουργίας διάταξης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις οι οποίες έγιναν κατά τη λειτουργία της διάταξης. Αυτές οι μετρήσεις αποτυπώνονται και με τη χρήση διαγραμμάτων για την καλύτερη εκτίμηση της λειτουργίας της διάταξης. Επιπλέον, αναφέρονται οι παραδοχές και το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στα οποία σημειώθηκαν τα αποτελέσματα και η ερμηνεία τους.

7.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Ξεκινώντας τη μελέτη έγιναν κάποιες παραδοχές, αυτό έγινε για την απλούστευση των υπολογισμών. Η επίδραση των παραδοχών στα αποτελέσματα είναι μικρότερη του 5%.

Οι παραδοχές είναι οι εξής:

- Κάποια εξαρτήματα της συσκευής όπως ρακόρ και σύνδεσμοι δεν είναι μονωμένα και υπάρχουν απώλειες θερμότητας.
- Μετά το πέρας του πειράματος αφήσαμε λίγο χρόνο μέχρι το νερό να απορροφήσει όλη την θερμότητα από το πηνίο και να πάρουμε μια καλή μέτρηση θερμοκρασίας. Κατά την διάρκεια αυτή όμως το πηνίο λόγω της καλής θερμικής αγωγιμότητας που έχει λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας και αποβάλλει την θερμότητα του νερού προς το περιβάλλον, παρόλα αυτά όμως επειδή το χρονικό διάστημα που αφήνουμε την αντλία ενεργοποιημένη μετά το πείραμα είναι πολύ μικρό οι απώλειες είναι μικρές.
- Η θερμοχωρητικότητα του νερού μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία. Στους υπολογισμούς όμως χρησιμοποιήθηκε η τιμή της θερμοχωρητικότητας του νερού για 30°C. Επειδή η μεταβολή είναι παρά πολύ μικρή, θεωρήθηκε αμελητέα.
- Στις πειραματικές μετρήσεις αμελήθηκαν οι θερμικές απώλειες στο πηνίο λόγω ακτινοβολίας. Οι συγκεκριμένες απώλειες θεωρήθηκαν αμελητέες, λόγω της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας πηνίου και περιβάλλοντος. Το σύστημα υδρόψυξης, δεν επιτρέπει τη σημαντική αύξηση θερμοκρασίας στα περιφερειακά συστήματα.

7.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

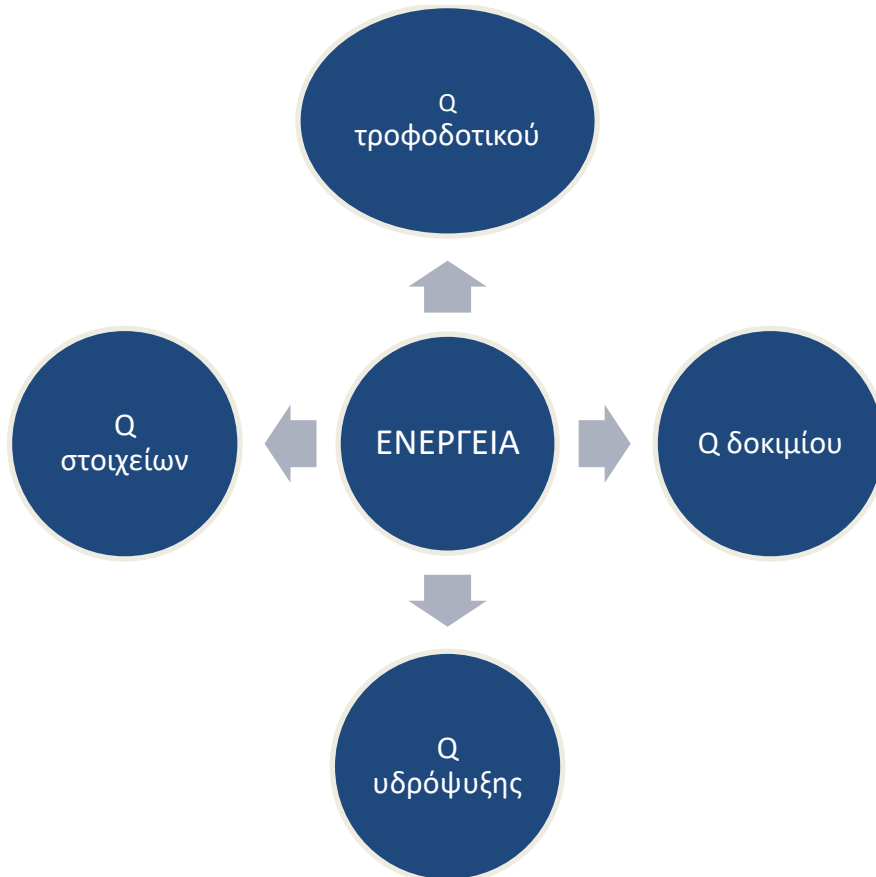
Στο Διάγραμμα 7.1, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού στο δοχείο ψύξης. Η μεταβολή της θερμοκρασίας, πλην της αρχικής περιόδου, είναι σχεδόν γραμμική. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού είναι της τάξης των 1.8 °C σε χρόνο περίπου 90 sec. Δεδομένου, ότι η θερμοκρασία του υλικού το οποίο θερμαίνεται, για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, έχει αυξηθεί σε επίπεδο θερμοκρασίας πυράκτωσης, η λειτουργία της επαγωγικής θέρμανσης τερματίζεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού είναι ικανοποιητική.



Διάγραμμα 7.1 Πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασία νερού

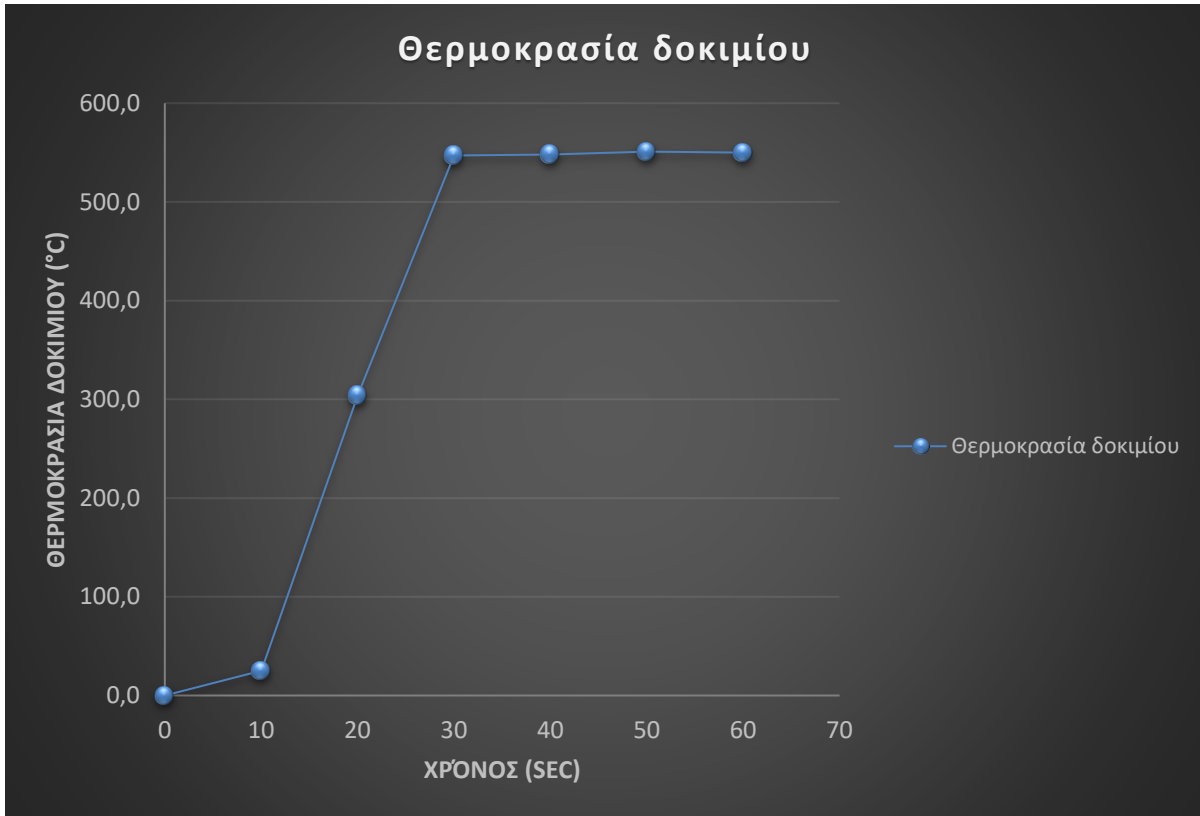
Για τον απαραίτητο υπολογισμό κατανάλωσης ενέργειας στη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής, πρέπει να λυθεί ένα σύστημα ενεργειακού ισοζυγίου. Όπως αποτυπώνεται και στην εικόνα 7.1, η συνολική ενέργεια στη συνέχεια λειτουργίας της διάταξης επιμερίζεται, στην ισχύ του τροφοδοτικού ($Q_{τροφ}$), στην ενέργεια θερμότητας του δοκιμίου ($Q_{δοκιμ}$), στην ενέργεια που απορροφήθηκε από το σύστημα της υδρόψυξης ($Q_{υδροψ}$) και από την θερμότητα των στοιχείων ($Q_{στοιχ}$). Η θερμότητα των στοιχείων είναι στην ουσία, η

Θερμότητα που εκλύεται από τα επιμέρους στοιχεία της συσκευής όπως για παράδειγμα την πλακέτα, το τροφοδοτικό, τους πυκνωτές κ.λ.π.



Εικόνα 7.1 Επιμερισμός κατανάλωσης ενέργειας

Η θερμοκρασία του δοκιμίου στο χρόνο αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 7.2. Γίνεται αντιληπτός ο μεγάλος ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας από τα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας της συσκευής μέχρι το σημείο των περίπου 550 °C όπου παρατηρείται και η μέγιστη θερμοκρασία.



Γράφημα 7.2 Πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας δοκιμίου

Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω σχέσεις είναι οι εξής:

$$Q_{\tauροφ} = W = I \times V \quad (7.1)$$

$$Q_{δοκιμ} = m_{δοκ} \times c_{pδοκ} \times \Delta T_{δοκ} \quad (7.2)$$

$$Q_{υδροψ} = m_{νερου} \times c_{pνερου} \times \Delta T_{νερου} \quad (7.3)$$

Επιπλέον ισχύει ότι:

$$Q_{\tauροφ} = Q_{δοκιμ} + Q_{υδροψ} + Q_{στοιχ} \quad (7.4)$$

Επομένως από τις εξισώσεις 7.1, 7.2, 7.3 και 7.4 προκύπτει ότι:

$$Q_{στοιχ} = Q_{\tauροφ} - Q_{δοκιμ} - Q_{υδροψ} \quad (7.5)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

- Κατά τη λειτουργία της συσκευής μετρήθηκαν για το τροφοδοτικό ότι $I=10A$ και $V=30V$. Επομένως από τη σχέση 7.1 προκύπτει ότι :

$$Q_{τροφ} = 300 \text{ Joule/sec.}$$

- Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι το δοκίμιο για να φτάσει τους $650^{\circ}C$ από τους $25^{\circ}C$ χρειάστηκαν $24sec$. Το δοκίμιο αποτελείται από χάλυβα επομένως πρέπει να υπολογιστεί η μάζα του. Το βάρος του περιγράφεται από την εξίσωση 7.6.

$$V = \pi r^2 L \quad (7.6)$$

Όπου η ακτίνα του δοκιμίου $r=3mm$, το μήκος των σπειρών $L=75mm$. Επομένως $V=0,21125 \times 10^{-5} m^3$. Επιπλέον από τον τύπο της πυκνότητας:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7.7)$$

Και γνωρίζοντας ότι $\rho_{\chi\alpha\lambda\upsilon\beta\alpha}=7740kg/m^3$, υπολογίζεται ότι $m_{\delta\omicron\kappa\iota\mu} = 0,016kg$. Άρα από τη σχέση 7.2 προκύπτει ότι $Q_{\delta\omicron\kappa\iota\mu} = 212,79 \text{ Joule/sec}$

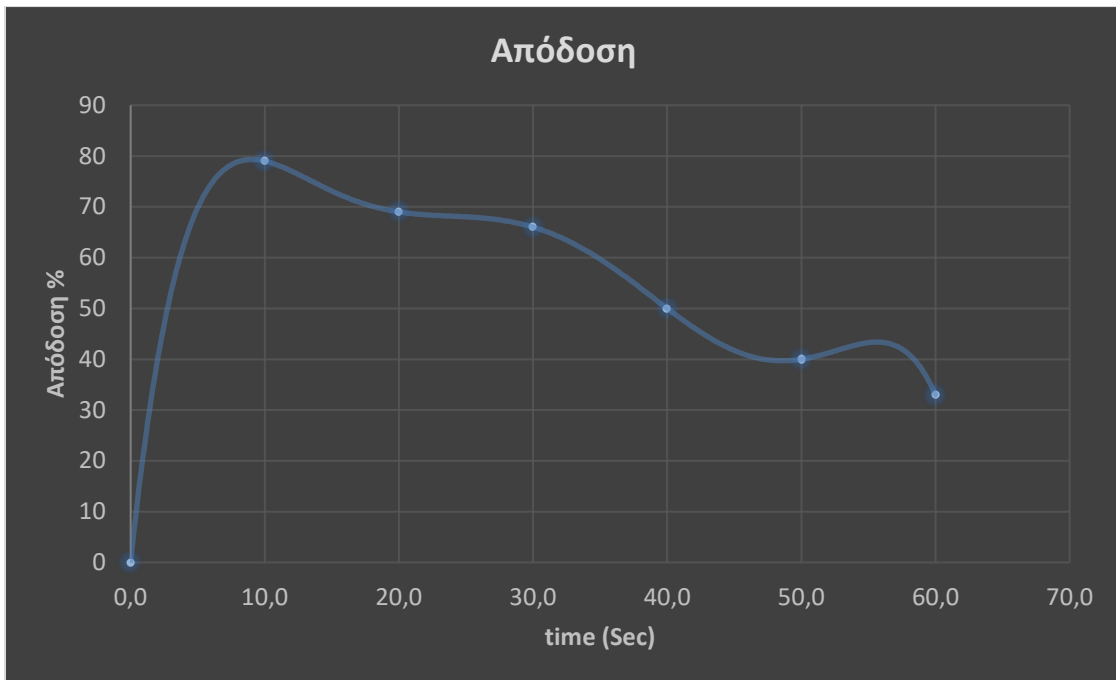
- Επιπλέον μετρήθηκε ότι $m_{\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon}=0,5kg$ και $c_{\rho\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon}=4,1175 \text{ KJ/kg K}$. Από τον πίνακα 7.1 μετρήθηκε και υπολογίζεται ότι $\Delta T_{\nu\epsilon\rho\omicron\upsilon} = 1,7^{\circ}C$. Επομένως από τη σχέση 7.3 προκύπτει ότι: $Q_{\nu\delta\rho\omicron\psi} = 58,16 \text{ Joule/sec}$

Επομένως το υπολειπόμενο ποσό της θερμικής ενέργειας της συσκευής το οποίο απαιτείται ώστε να καλυφθούν τα $300W$ του τροφοδοτικού είναι το $Q_{\sigma\tau\omicron\iota\chi}$ το οποίο μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά. Επομένως από τη σχέση 7.5 προκύπτει ότι $Q_{\sigma\tau\omicron\iota\chi} = 29,05 \text{ Joule/sec}$.

Πίνακας 7.1 Πειραματικές μετρήσεις

| Time(sec) | current(A) | Volt(V) | water temp | Pin (Watt) | Element temp (°C) |
|-----------|------------|---------|------------|------------|-------------------|
| 0 | 10 | 30 | 31,8 | 300 | 25 |
| 10 | 10 | 30 | 31,8 | 300 | 304 |
| 20 | 10 | 30 | 31,8 | 300 | 547 |
| 30 | 10 | 30 | 31,9 | 300 | 548 |
| 40 | 10 | 30 | 32,3 | 300 | 551 |
| 50 | 10 | 30 | 32,5 | 300 | 550 |
| 60 | 10 | 30 | 32,6 | 300 | 548 |
| 70 | 0 | 0 | 33,1 | 0 | |
| 80 | 0 | 0 | 33,3 | 0 | |
| 90 | 0 | 0 | 33,5 | 0 | |

Στο γράφημα 8.3 παρατηρείται η απόδοση της συσκευής στο χρόνο. Σε χρόνο 10 sec η συσκευή φτάνει περίπου το 80% της αποδοτικότητας χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο δοκίμιο και υλικό. Φυσικά η αποδοτικότητα της συσκευής θα ποικίλει ανάλογα τα διαφορετικά υλικά που θα θερμαίνονται κάθε φορά. Η μετέπειτα πτώση της απόδοσης συμβαίνει γιατί το δοκίμιο φτάνει τη μέγιστη θερμοκρασία από τα πρώτα μόλις δευτερόλεπτα και έπειτα χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες.



Γράφημα 7.3 Απόδοση συσκευής στο χρόνο

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, φαίνεται ότι η διάταξη επαγωγικής θέρμανσης λειτουργεί ικανοποιητικά με αρκετά ανοικτά θέματα βελτιστοποίησης. Κατά τη φάση της υλοποίησης, υπήρξαν αρκετές αστοχίες για τις οποίες θα γίνει αναφορά στη συνέχεια. Η τελική μορφή της συσκευής που δημιουργήθηκε είναι λειτουργική πετυχαίνοντας έναν ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 80% μέσα από τις πειραματικές μετρήσεις όπως αποτυπώθηκε παραπάνω.

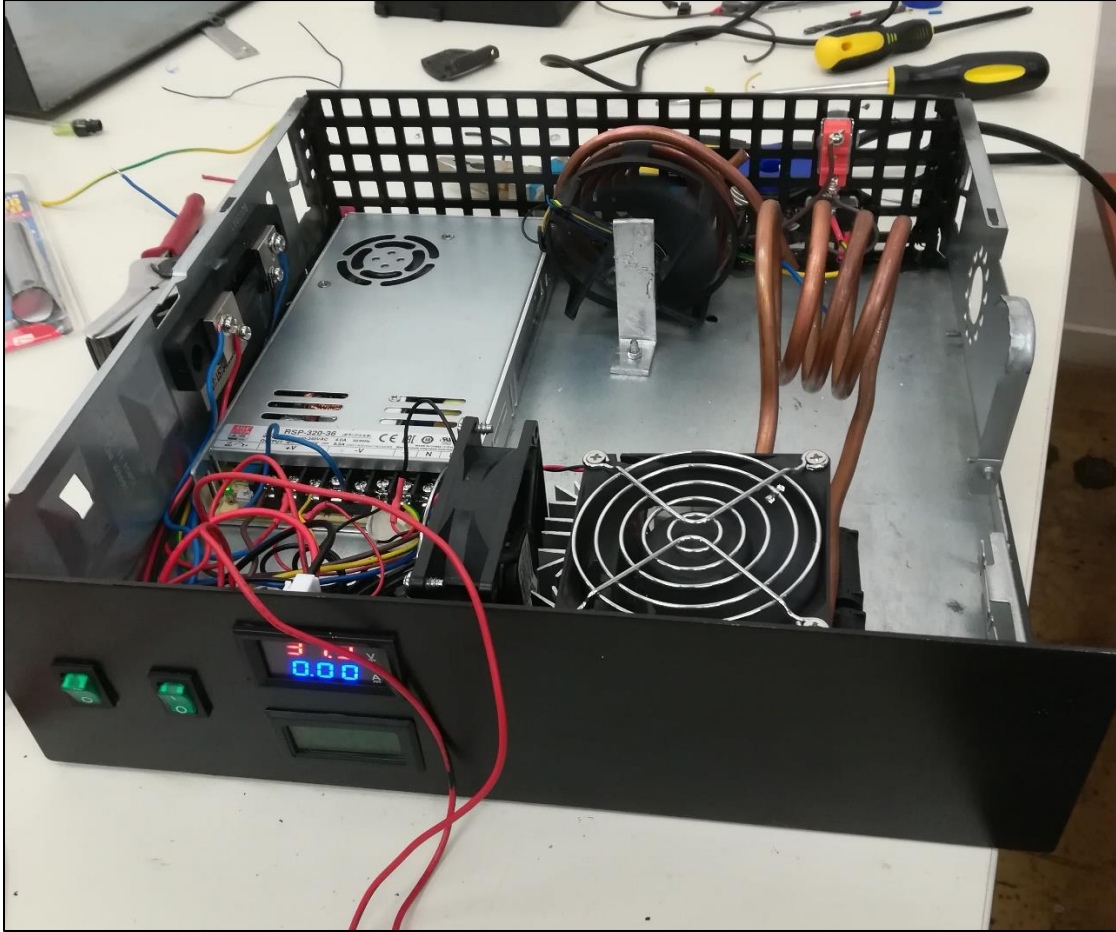
7.4.1 Αποτυχημένες δοκιμές

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο αρχικό πλάνο υπήρξε ένας αριθμός από ιδέες προκειμένου να δημιουργούνταν μια πλήρως λειτουργική συσκευή σε ικανοποιητικό βαθμό. Αρχικά έγινε πειραματικά η προσπάθεια να τροφοδοτηθεί η πλακέτα της διάταξης με 2 τροφοδοτικά ηλεκτρονικού υπολογιστή με παράλληλη σύνδεση ώστε το ένα να μη λειτουργούσε ως μπαταρία. Τελικά αυτή η προσπάθεια εγκαταλείφθηκε αφού ήταν αδύνατον να παραχθεί η απαιτούμενη ένταση ρεύματος ώστε να μπορούσε να τροφοδοτηθεί η πλακέτα κατάλληλα.

Επιπλέον είχε σχεδιαστεί ένα διαφορετικό κουτί (Εικόνα 8.1) όπου θα τοποθετούνταν μέσα η διάταξη όπου τελικά απορρίφθηκε για χωροταξικούς λόγους όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 8.2 αφού δεν ήταν δυνατόν να τοποθετηθούν όλα τα εξαρτήματα της συσκευής μέσα σε αυτό.



Εικόνα 8.1 Αρχικό κουτί συσκευής



Εικόνα 8.2 Εσωτερικό μέρος αρχικού κουτιού συσκευής

Ένα ακόμα τμήμα των εξαρτημάτων της συσκευής το οποίο ερευνήθηκε ιδιαίτερα ήταν τα διάφορα κόιλ όπου κατασκευάστηκαν μέχρι να επιτευχθεί το βέλτιστο σχήμα. Τα περισσότερα αρχικά πειραματικά κόιλ που δημιουργήθηκαν δεν ανταποκρίνονταν σωστά στην επαγωγή και ως εκ τούτου η απόδοση της συσκευής ήταν περιορισμένη έως και ανύπαρκτη. Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα διαρρέονταν από μεγάλη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς να επιτυγχάνεται αύξηση στη θερμοκρασία του δοκιμίου.

7.4.2 Μελλοντική ανάπτυξη – Βελτίωση συσκευής

Ως νέα δημιουργία το πρωτότυπο της συσκευής παρουσίασε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς της απόδοσή του. Φυσικά, υπάρχουν πιθανές βελτιώσεις τόσο σχεδιαστικές όσο και τεχνικές για την καλύτερη λειτουργία της.

Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε και είναι ενσωματωμένο στη συσκευή αποτελείται από 300 W. Σίγουρα η χρήση ενός μεγαλύτερου τροφοδοτικού θα είχε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα ώστε η πλακέτα να λειτουργούσε στα 20A. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό όπου θα μπορούσε να βελτιωθεί θα ήταν η ευκολότερη εναλλαγή των κόιλ. Πιο συγκεκριμένα ο μηχανισμός όπου συγκρατεί τα κόιλ και τα ενσωματώνει στη συσκευή να μπορούσε να διαφοροποιηθεί και να καθίσταται ευκολότερη η αποσύνδεση/επανασύνδεσή τους. Τέλος η μείωση του όγκου της συσκευής θα την καθιστούσε πιο χρηστική στη μεταφορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ:

Σαββάκης Κ. Ε. (2002). Τεχνολογία Υλικών- Υλικά τεχνολογικών εφαρμογών, 2^η έκδοση. Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος «Ιών».

Σιδεράκης Κ. Γ. (2010), Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές- Σημειώσεις Διαλέξεις.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

Boadi A., Tsuchida Y., Todaka T. and Enokizono M. (2005). "Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method," *in IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 4048-4050,

Chapman Stephen J. (1985). *Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill*

Enokizono M. and Soda N. (1995), "Magnetic field analysis by finite element method using effective anisotropic field," *in IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, no. 3, pp. 1793-1796, doi: 10.1109/20.376384

Flanagan, William M. (1993). *Handbook of Transformer Design and Applications McGraw-Hill Professional*. Chap. 1, p. 1–2.

Haimbaugh Richard E. (2001). *Practical Induction Heat Treating. ASM International*

Hayt, William H. (1989). *Engineering Electromagnetics, McGraw-Hill*, ISBN 978-0070274068

Johnson, Howard; Graham, Martin (2003). *High-Speed Signal propagation Advanced Black Magic (3rd ed.)*. Prentice Hall. p. 58-78. ISBN 978-0-13-084408-8.

Kramer, C., Mühlbauer, A., & von Starck, A. (2005). *Handbook of Thermoprocessing Technologies Fundamentals, Processes, Components, Safety. Essen: Vulkan-Verlag*.

Popovic, Zoya; Popovic, Branko (1999), Chapter 20, The Skin Effect, Introductory

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Electromagnetics, *Prentice-Hall*, ISBN 978-0-201-32678-9

Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. (2002). Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing), *CRC Press*; 1 edition

Serway R. & Jewett J. (2013). Physics for Scientists and Engineers, Cengage Learning 9 edition

Zinn S. and Semiatin S.L. (1988). Coil design and fabrication: basic design and Modifications. *ASM International*