



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΜΠ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ  
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ  
POWDER-IN-TUBE ΚΑΙ ΕΛΑΣΗΣ  
ΜΟΡΦΗΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΛΕΩΝΙΔΑΣ Γ. ΜΙΧΑΛΑΚΟΣ**

Επί πτυχίο Φοιτητής Μηχανολόγος Μηχανικός

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2014**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΜΠ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ  
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ  
POWDER-IN-TUBE ΚΑΙ ΕΛΑΣΗΣ  
ΜΟΡΦΗΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΛΕΩΝΙΔΑΣ Γ. ΜΙΧΑΛΑΚΟΣ**

Επί πτυχίο Φοιτητής Μηχανολόγος  
Μηχανικός

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2014**



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |    |
|---|----|
| Πρόλογος.....                                       | i  |
| Περίληψη.....                                       | ii |
| 1. Εισαγωγή.....                                    | 1  |
| 2. Έλαση Μορφής .....                               | 2  |
| 2.1. Γενικά για τις Κατεργασίες Διαμόρφωσης.....    | 2  |
| 2.2. Κατεργασία της Έλασης.....                     | 4  |
| 2.3. Περιγραφή της Έλασης Μορφής .....              | 9  |
| 3. Μέθοδος Powder in Tube (PIT).....                | 12 |
| 3.1. Περιγραφή Μεθόδου .....                        | 12 |
| 3.2. Κονιομεταλλουργία .....                        | 13 |
| 3.3. Υλικά και Εφαρμογές .....                      | 17 |
| 3.3.1. Μέταλλα .....                                | 17 |
| 3.3.2. Αλουμίνιο (Al).....                          | 19 |
| 3.3.3. Υπεραγωγοί.....                              | 21 |
| 3.3.3.1. Γενικά.....                                | 21 |
| 3.3.3.2. Διβορίδιο Μαγνησίου .....                  | 31 |
| 4. Πειραματική διαδικασία.....                      | 35 |
| 4.1. Σκοπός .....                                   | 35 |
| 4.2. Διατάξεις.....                                 | 35 |
| 4.3. Προετοιμασία και σχεδιασμός πειραμάτων.....    | 38 |
| 4.4. Χαρακτηρισμός Δειγμάτων .....                  | 41 |
| 4.4.1 Οπτικό μικροσκόπιο (OM) .....                 | 42 |
| 4.4.2 Σκληρομέτρηση υλικών .....                    | 42 |
| 4.4.2.1 Γενικά .....                                | 42 |
| 4.4.2.2 Σκληρομέτρηση κατά Vickers.....             | 44 |
| 5. Αποτελέσματα.....                                | 46 |
| 5.1. Πειραματικά .....                              | 46 |
| 5.2 Παρατήρηση δοκιμίων .....                       | 52 |
| 5.2.1 Χαρακτηρισμοί με οπτική Μικροσκοπία (OM)..... | 52 |
| 5.2.2 Χαρακτηρισμοί σκληρομέτρησης.....             | 70 |
| 5.3 Συμπεράσματα.....                               | 73 |
| 6. Εφαρμογές Υπεραγώγιμων Υλικών.....               | 72 |
| 7. Τελικά συμπεράσματα .....                        | 88 |
| 8. Μελλοντική έρευνα .....                          | 89 |
| 9. Βιβλιογραφία.....                                | 90 |



## Πρόλογος

Η πτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε στον τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και σκοπός της είναι η μελέτη της μεθόδου “Powder-in-Tube” σε συνδυασμό με την κατεργασία μορφοποίησης της έλασης μορφής. Επιλέχθηκαν λοιπόν αντιπροσωπευτικά υλικά και κατασκευάστηκαν δοκίμια βάσει εφαρμογών που έχει το αντικείμενο της παρούσης μελέτης στην βιομηχανία και την έρευνα, ώστε να εξεταστεί μετά την κατασκευή και την μορφοποίησή η τελική δομή τους, μακροσκοπικά και μικροσκοπικά, συναρτήσει των υλικών και των συνθηκών κατεργασίας τους. Τα συμπεράσματα προκύπτουν από τους χαρακτηρισμούς και τα μεγέθη που μετρήθηκαν κατά την έλαση μορφής.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου και ειλικρινείς ευχαριστίες στον καθηγητή Δημήτριο Ε. Μανωλάκο ο οποίος με τίμησε με την ανάθεση της παρούσης πτυχιακής εργασίας, ενώ ως επιβλέπων καθηγητής, καθοδήγησε με προθυμία, έδωσε σημαντικές συμβουλές και παραχώρησε σημαντικά μέσα για την εκπόνησή της. Ευχαριστώ ιδιαίτερος επίσης τον υπ. διδάκτορα Πρέσσα Γιάννη για την βοήθεια και την συμπαράστασή του καθ’ όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίου Κερασιώτης Κωνσταντίνος και Μελισσάς Νικόλαος που ως τεχνικοί του εργαστηρίου βοήθησαν με προθυμία για την εκτέλεση του πειράματος.

Λεωνίδας Γ. Μιχαλάκος

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στη μελέτη της έλασης μορφής κυλινδρικής διατομής όταν αυτή συνδυάζεται με τη μέθοδο “Powder-in-Tube” για την παραγωγή υπεραγωγίμης ράβδου, των συνθηκών που επηρεάζουν αυτήν καθώς και την κατεργασία διαμόρφωσης, της τελικής γεωμετρίας και της μικροδομής των εξεταζόμενων δειγμάτων.

Η εργασία αυτή ερευνάει έναν εναλλακτικό τρόπο κατασκευής υπεραγωγίμων ράβδων, οι οποίες έχουν ευρεία χρήση στην βιομηχανία. Παραδείγματα τέτοιου είδους εφαρμογών μπορούμε να δούμε:

1. Στην κατασκευή υπεραγωγίμων σιδηρογραμμών τρένου
2. Σε μηχανήματα βιομαγνητικής τομογραφίας.
3. Γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες με την χρήση υπεραγωγίμων καλωδίων πετυχαίνουν απόδοση μέχρι και 99%
4. Στους υπολογιστές
5. Μετρητική Τεχνολογία
6. Υπεραγωγίμες ηλεκτρικές Μηχανές
7. Μαγνητικά ρουλεμάν και στρόφαλοι ισχύος
8. Υπεραγωγήμα ηλεκτρικά δίκτυα
9. Υπεραγωγίμοι μαγνήτες και φυσική υψηλών τεχνολογιών
10. Πολεμικές εφαρμογές

Στόχος μας είναι η παραγωγή τεμαχίων από μεταλλικές μίτρες αλουμινίου με υπεραγωγήμη σκόνη διβορίδιου του Μαγνησίου ( $MgB_2$ ). Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε μπιγιέτες αλουμινίου είναι ιδιότητες του μετάλλου. Κρίναμε, και βάση παλαιότερων πειραμάτων, ότι με την κατάλληλη διάνοιξη οπής για την πλήρωση της σκόνης, θα ανταποκριθεί με επιτυχία στο πείραμα. Το διβορίδιου του Μαγνησίου ( $MgB_2$ ) χρησιμοποιήθηκε λόγω των υπεραγωγίμων ιδιοτήτων του.

Οι κατευθυντήριοι άξονες πάνω στους οποίους κινηθήκαμε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι οι εξής:

1. Να παράγουμε λειτουργικά τελικά τεμάχια σε άρτια μορφή και χωρίς σημαντικές φθορές
2. Να χρησιμοποιήσουμε όσο γίνεται ποιο οικονομική και γρήγορη διεργασία για την παραγωγή των τελικών τεμαχίων. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ βασικός και καθοριστικός σχετικά με τις αποφάσεις παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες.
3. Η σκόνη να συμπιεστεί επαρκώς έως μια μορφή η οποία να είναι αποδεκτή
4. Να καθορίσουμε το στάδιο της κατεργασίας στο οποίο θα πετύχουμε την αρτιότερη συμπίεση
5. Βελτιστοποίηση τελικού τεμαχίου με τον καθορισμό της διαμέτρου της οπής στην μπιγιέτα για την πλήρωσή της με την σκόνη του διβορίδιου του Μαγνησίου
6. Να εξαλείψουμε όσο το δυνατόν γίνεται τους παράγοντες της τυχαιότητας των τελικών δοκιμίων.
7. Να αξιολογήσουμε τα τελικά προϊόντα με την μέθοδο της οπτικής παρατήρησης καθώς και με τον έλεγχο σκληρότητας της τελικής μορφής της σκόνης.

Αρχικά λοιπόν γίνεται παράθεση των κυριότερων χαρακτηριστικών και μηχανισμών της έλασης μορφής και στη συνέχεια δίνεται μια περιγραφή της μεθόδου PIT, που αποτελεί τεχνική της κονιομεταλλουργίας. Για να είναι η εργασία όσο το δυνατόν πληρέστερη, μελετώνται τα χαρακτηριστικά των αντιπροσωπευτικών υλικών (μέταλλα, υπεραγωγοί) που χρησιμοποιήθηκαν και κυριότερα, οι εφαρμογές που έχουν στην βιομηχανία και την έρευνα. Στην συνέχεια γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, της προετοιμασίας και κατεργασίας των σκονών και των δοκιμίων και μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους χαρακτηρισμού που χρησιμοποιήσαμε. Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για διάφορα μεγέθη που αφορούν την έλαση μορφής σε συνδυασμό με την τελική γεωμετρία. Τέλος, για μια πιο ενδελεχή μελέτη της όλης κατεργασίας, ήταν απαραίτητο να γίνει χαρακτηρισμός των δειγμάτων, ώστε να παρατηρηθεί η μικροδομή του τελικού προϊόντος. Γι' αυτό το λόγο έγινε μια αρχική παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο με κύριο γνώμονα την μελέτη της διεπιφάνειας μήτρας-σκόνης και στην συνέχεια έγινε σκληρομέτρηση για να διαπιστωθεί η το επίπεδο σκληρότητας της σκόνης.

Λέξεις Κλειδιά:

Έλαση μορφής, Μέθοδος “Powder-in-Tube” (PIT), Κονιομεταλλουργία, MgB<sub>2</sub>, Μορφοποίηση Υπεραγωγών.



## 1. Εισαγωγή

Η Έλαση Μορφής γενικά χρησιμοποιείται για την κατεργασία δομικών ή μηχανολογικών εξαρτημάτων με ενιαία γεωμετρία στην διάμετρο, με κύριο γνώμονα την μαζική παραγωγή, καθώς αποτελεί μια απλή, γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδο. Επομένως ο συνδυασμός της με μια εξίσου απλή τεχνική, αυτή της μεθόδου “Powder- in-Tube” είναι το αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας, καθώς μπορεί να είναι απλές τεχνικές, όμως τα αποτελέσματα από την προαναφερθείσα τεχνική είναι αμφίβολα, αφού η μορφοποίηση σκόνης μέσα σε μεταλλικούς σωλήνες, αν και απλή στην σύλληψη, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Γι’ αυτό εξάλλου μέχρι πριν λίγες δεκαετίες, δεν υπήρχαν αναλυτικές μέθοδοι που θα εγγυούνταν την τελική μορφή και δομή τού προϊόντος, παρά μόνο εμπειρικοί τύποι αμφιβόλου αξιοπιστίας.

Η πληρότητα της παρούσας εργασίας γίνεται προσπάθεια να προσεγγιστεί με τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων μας, ώστε να δούμε και σε επίπεδο μικροδομής την επιρροή των διαφόρων μεγεθών που μελετήσαμε, εκτός των μετρήσεων και της μακροσκοπικής ανάλυσης. Για την καλύτερη μελέτη όμως της έλασης μορφής και της τεχνικής PIT, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε αρχικά στο θεωρητικό υπόβαθρο αυτών των μεθόδων και των μηχανισμών που τις διέπουν.

## 2. Έλαση Μορφής

### 2.1. Γενικά για τις Κατεργασίες Διαμόρφωσης

Η μορφοποίηση των μετάλλων, δηλαδή οι πρόσδοση σε αυτά των κατάλληλων ιδιοτήτων και των επιθυμητών σχημάτων ενδέχεται να γίνει απευθείας μέσω χύτευσης (προϊόντα χύτευσης) ή συνήθως μετά την χύτευση σε πλινθώματα να υποστούν περαιτέρω κατεργασία, είτε κοπής είτε διαμόρφωσης.

Η έλαση μορφής, που μελετάμε στην παρούσα εργασία, ανήκει στις κατεργασίες διαμόρφωσης, δηλαδή στις κατεργασίες όπου έχουμε πλαστική παραμόρφωση με πρόσδοση μηχανικού έργου και διατήρηση της μάζας του υλικού. Αυτές διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης τού συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή κλπ.) και σε κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση κλπ.)

Όλες οι παραπάνω κατεργασίες διαμόρφωσης μπορούν να γίνουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης (επαναδιάταξη των κόκκων) του μετάλλου, είτε σε μια θερμοκρασία ανάμεσα στις προηγούμενες δύο. Με αυτόν τον τρόπο, οι κατεργασίες διαμόρφωσης χωρίζονται σε ψυχρές, θερμές και ημίθερμες αντίστοιχα.

Τα πλεονεκτήματα επιγραμματικά της κάθε μεθόδου φαίνονται παρακάτω (οι ημίθερμες συνδυάζουν και από τις κύριες δύο κατηγορίες πλεονεκτήματα).

#### Ψυχρή κατεργασία:

- Ακριβέστερη τελική γεωμετρία τεμαχίου
- Καλύτερη ποιότητα επιφανείας
- Απλούστερη διάταξη εργαλειομηχανών

#### Θερμή κατεργασία:

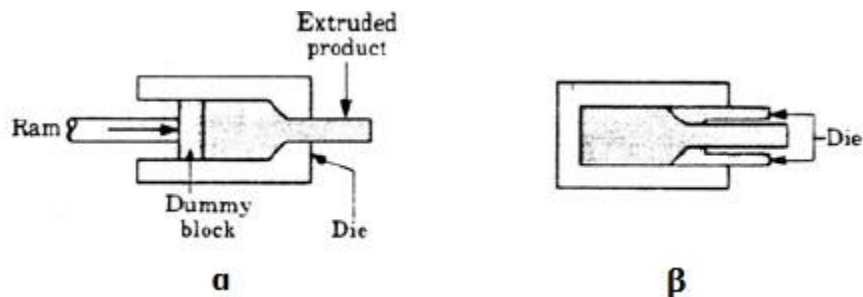
- Μικρότερες Τάσεις και επομένως Έργο κατεργασίας
- Ταχύτερη παραμόρφωση (λιγότερα πάσα)
- Δεν έχουμε φαινόμενα εργοσκήληρυνσης (αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο).

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι αν θέλουμε καλύτερη επιφάνεια και ακριβέστερες διαστάσεις τελικού προϊόντος, ασχέτως του δαπανούμενου έργου, επιλέγουμε ψυχρές κατεργασίες. Παράλληλα κατά την ψυχρή κατεργασία η κόκκοι προσανατολίζονται καλύτερα προς μία κατεύθυνση και έτσι έχουμε καλύτερες μηχανικές και μαγνητικές ιδιότητες.

Η επιθυμητή γεωμετρία του τελικού προϊόντος καθορίζει εν τέλει το είδος της κατεργασίας διαμόρφωσης και έτσι παρουσιάσουμε τις κυριότερες κατεργασίες διαμόρφωσης συμπαγούς υλικού συνοπτικά παρακάτω, με την έλαση να αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο:

### Διέλαση

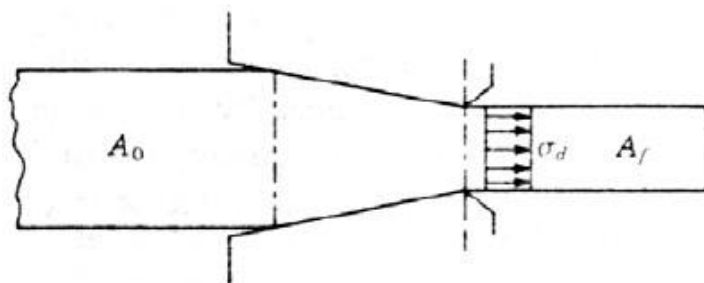
Η βασική μορφή της διέλασης είναι η πίεση τεμαχίου ώστε να διέλθει μέσα από το άνοιγμα μιας μήτρας. Ανάλογα με την κίνηση του τεμαχίου ως προς την μήτρα έχουμε την άμεση και την έμμεση διέλαση. Στην άμεση, το τεμάχιο σπρώχνεται από έμβολο και η μήτρα είναι ακίνητη, ενώ στην έμμεση η μήτρα κινείται ως προς το ακίνητο τεμάχιο (σχ. 2.1).



Σχ. 2.1: Σχηματική παράσταση Διέλασης, Άμεσης (α) και Έμμεσης (β).

### Ολκή(συρματοποίηση)

Η ολκή είναι ουσιαστικά η μείωση της διατομής του σύρματος μέσω ελκυσμού, διαμέσου του ανοίγματος ενός (σχ. 2.2) ή πολλών διαδοχικών καλουπιών. Η λίπανση είναι απαραίτητη καθώς η κατεργασία αυτή γίνεται εν ψυχρώ.

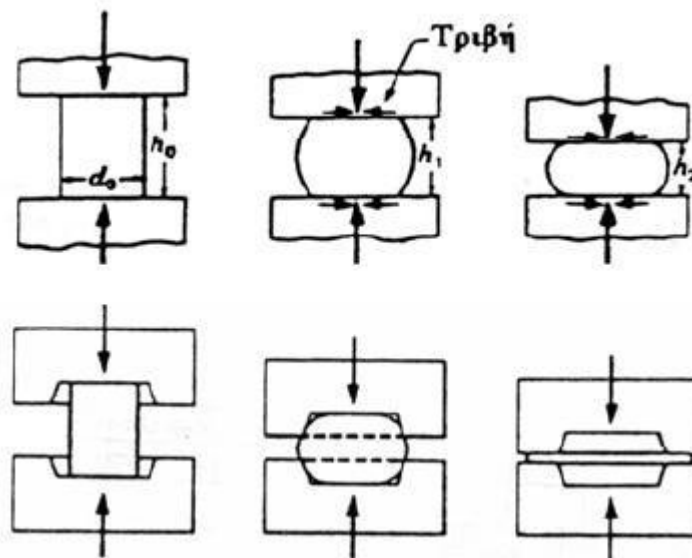


Σχ. 2.2: Σχηματική παράσταση Ολκής.

### Σφυρηλάτηση

Κατά την κατεργασία της σφυρηλάτησης το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά με εφαρμογή πίεσης ή κρούσης. Ο κύριος μηχανισμός που την διέπει είναι της θλίψης και

γίνεται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορεί να γίνει σε ανοικτή ή σε κλειστή μήτρα (σχ. 2.3).



Σχ. 2.3: Σφυρηλάτησης Ανοικτής (πάνω) και Κλειστής (κάτω) Μήτρας.

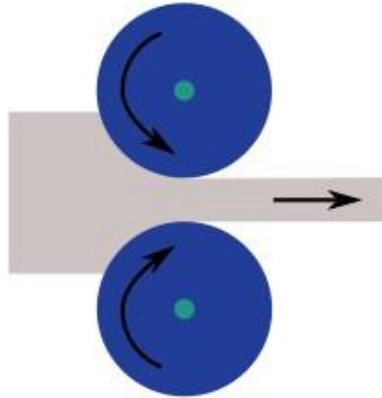
Πριν περάσουμε στην κατεργασία που μας αφορά, την έλαση μοργής, αξίζει να αναφερθούμε στην κατεργασιμότητα, δηλαδή την ικανότητα των υλικών να παραμορφώνονται πλαστικά. Η μηχανική κατεργασία βασίζεται ακριβώς σε αυτή την ιδιότητα των υλικών, να αλλάζουν σχήμα με πρόσδοση μηχανικού έργου, γεγονός που σε μικροσκοπική κλίμακα οδηγεί στην επιμήκυνση των κόκκων κατά την διεύθυνση της κατεργασίας. Έτσι οι κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις δεν κατανέμονται πλέον τυχαία μέσα στην μάζα του υλικού, αλλά αποκτούν κάποιο προτιμητέο προσανατολισμό. Άμεσο αποτέλεσμα του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού είναι η εκδήλωση ανισοτροπίας στο υλικό.

## 2.2. Κατεργασία της Έλασης

Έλαση (rolling) έχουμε όταν ένα τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων (τυμπάνων) (σχ. 2.4) και ο κύριος μηχανισμός που συναντάται είναι της θλίψης. Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Η Έλαση σαν κατεργασία αναπτύχθηκε περί τα τέλη του 16<sup>ου</sup> αιώνα (1590 Βέλγιο και Αγγλία), και διακρίνεται σε:

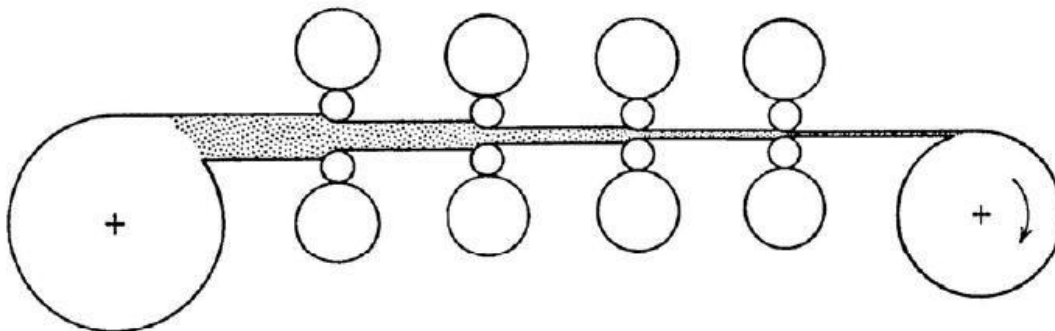
ο Έλαση μιγέτας (billet), όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading)

ο Έλαση πλάκας (slab), κατά την οποία δεν παρατηρείται μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος.



Σχ. 2.4: Σχηματική αναπαράσταση έλασης.

Η έλαση εκτελείται σε διάφορες φάσεις (πάσα). Το πρωτογενές υλικό είναι πλίνθωμα (ingot), προϊόν χύτευσης, ενώ τα προϊόντα των επόμενων φάσεων διακρίνονται σε επιμήκη (ράβδοι, μπιγέτες, μορφοδοκοί) και σε πλατιά προϊόντα (πλάκες, ελάσματα, ταινίες). Μία τυπική διάταξη ελάστρων εν σειρά, όπου επιτυγχάνεται σταδιακή μείωση του πάχους, φαίνεται παρακάτω (σχ. 2.5):



Σχ. 2.5: Τυπική διάταξη συνεχών ελάστρων.

Παράλληλα αξίζει να αναφέρουμε ξανά ότι κατά την ψυχρή έλαση, που έγινε στην παρούσα εργασία, το υλικό δεν μπορεί να παραμορφωθεί γρήγορα ούτε πολύ, καθώς απαιτούνται πολλά πάσα και η τελική μείωση του πάχους (ή της διατομής) δεν ξεπερνά το 90%, λόγω ανισοτροπίας, εργοσκλήρυνσης και μεγάλου έργου που χρειάζεται. Όμως για εφαρμογές που μας ενδιαφέρει η ακρίβεια στην γεωμετρία και την επιφάνεια του τελικού προϊόντος, είναι μονόδρομος, ενώ αυξάνεται και το όριο διαρροής του υλικού μας.

Η έλαση προτιμάται γενικότερα κυρίως λόγω του μικρού κόστους και χρόνου κατεργασίας και της ευκολίας «στησίματος» της διάταξης.

Τα ελαττώματα που παρουσιάζονται κατά την έλαση, εκτός από τα επιφανειακά και τα εσωτερικά ελαττώματα τού υλικού, οφείλονται κυρίως στην παραμόρφωση του ελαστρού, είτε από αυτήν καθ' εαυτή την εργαλειομηχανή, είτε λόγω του υλικού που κατεργαζόμαστε.

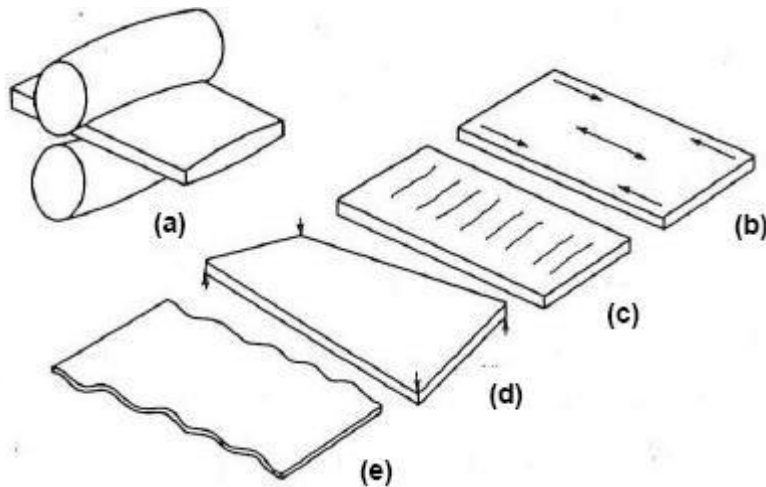
Έτσι βλέπουμε παρακάτω (σχ. 2.6) ότι όταν το έλαστρο καμφθεί (a) μπορεί να έχουμε:

(b) Παραμένουσες τάσεις, θλιπτικές στα άκρα και εφελκυστικές στο κέντρο

(c) Ρωγμές στο κέντρο του ελάσματος (zipper breaks) (d)

Στρέβλωση (warping)

(e) Κυματισμούς στα άκρα (crepe-paper effect)



Σχ. 2.6: Ελαττώματα κατά την έλαση όταν τα έλαστρα παρουσιάζουν κάμψη.

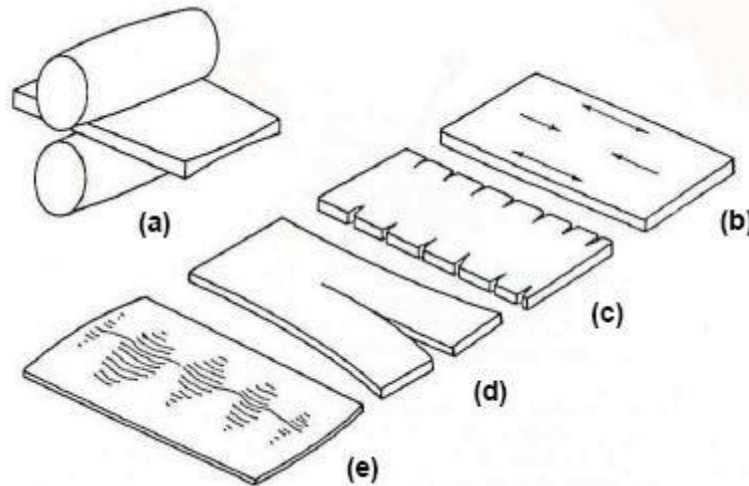
Με τον ίδιο τρόπο βλέπουμε (σχ. 2.7) ότι όταν το έλαστρο παραείναι «σφικτό» (a), μπορεί να έχουμε:

(b) Παραμένουσες τάσεις, εφελκυστικές στα άκρα και θλιπτικές στο κέντρο

(c) Ρωγμάτωση άκρων (edge cracking) (d)

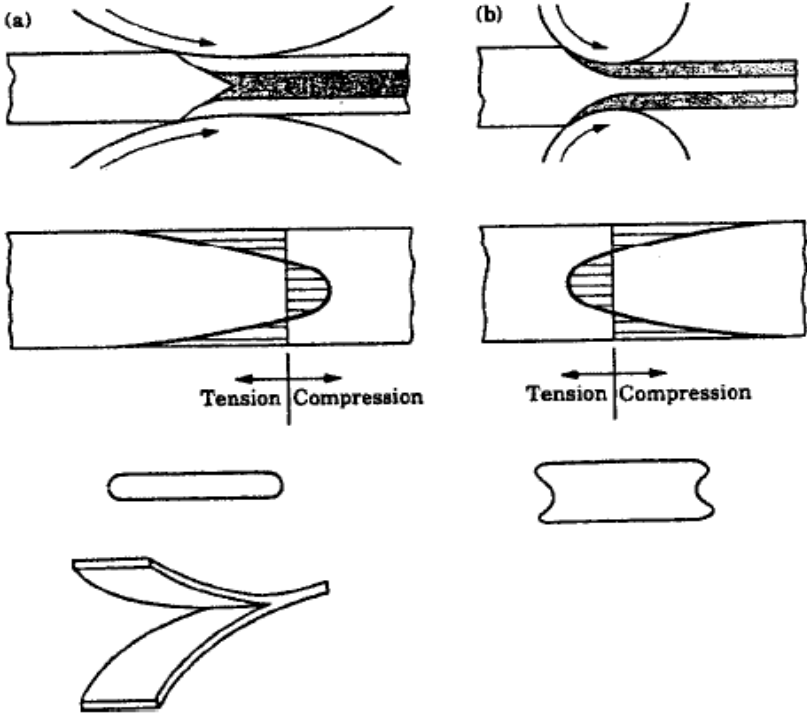
Κεντρικό αποχωρισμό (center split)

(e) Κυματισμούς στο κέντρο (center line wrinkling)



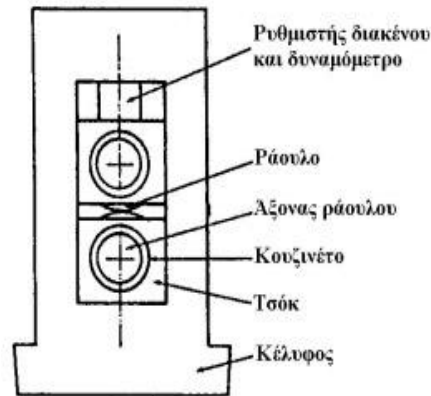
Σχ. 2.7: Ελαττώματα κατά την έλαση όταν τα ελαστρα είναι «σφικτά».

Τέλος, ενδέχεται να έχουμε και άλλα δομικά ελαττώματα, κυρίως από την ανομοιογενή παραμόρφωση κατά το πάχος (σχ. 2.8), είτε λόγω μεγάλων τυμπάνων ή/και μειώσεων πάχους (το ελάττωμα της κροκοδειλίας φαίνεται τελευταίο) (a), είτε λόγω μικρών τυμπάνων/μειώσεων πάχους (b):



Σχ. 2.8: Ελαττώματα λόγω μεγάλων (a) και μικρών (b) τυμπάνων/μειώσεων πάχους.

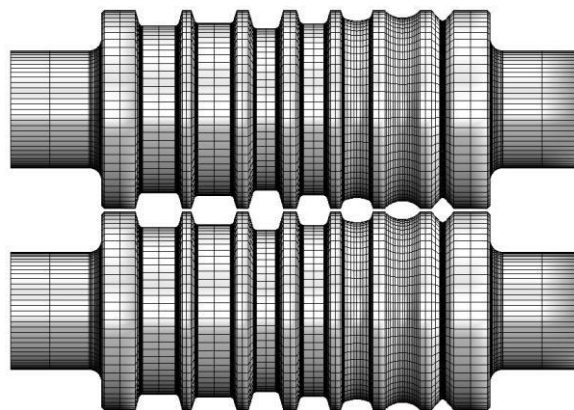
Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Αποτελείται από τα ράουλα (rolls), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε κουζινέτα (bearings), ενώ όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ειδικό κέλυφος (housing) όπως βλέπουμε και στο σχήμα παρακάτω (σχ. 2.9).



Σχ. 2.9: Τυπική διάταξη εργαλειομηχανής έλασης (ελάστρου).

Τα άκρα των αξόνων είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να συνδέονται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με το αξονικό σύστημα της εγκατάστασης, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει κίνηση στα ράουλα (ανεξάρτητη για κάθε ράουλο) παραλαμβάνοντας ισχύ από σύστημα ηλεκτροκινητήρα/μειωτήρα.

Τα ράουλα είναι χαλύβδινα κυλινδρικά τύμπανα με ομοιόμορφη διατομή ή έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα και έτσι είναι ράουλα μορφής (σχ. 2.10), ώστε να αποδίδουν το αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα στο τελικό προϊόν. Τα ράουλα που επιτελούν την πλαστική παραμόρφωση τοποθετούνται με οριζόντιους άξονες το ένα πάνω στο άλλο, ενώ κατακόρυφα ράουλα χρησιμοποιούνται βοηθητικά για τον έλεγχο του πλάτους του τελικού προϊόντος.



Σχ. 2.10: Τυπικό Ράουλο Μορφής με πολλές γεωμετρίες.

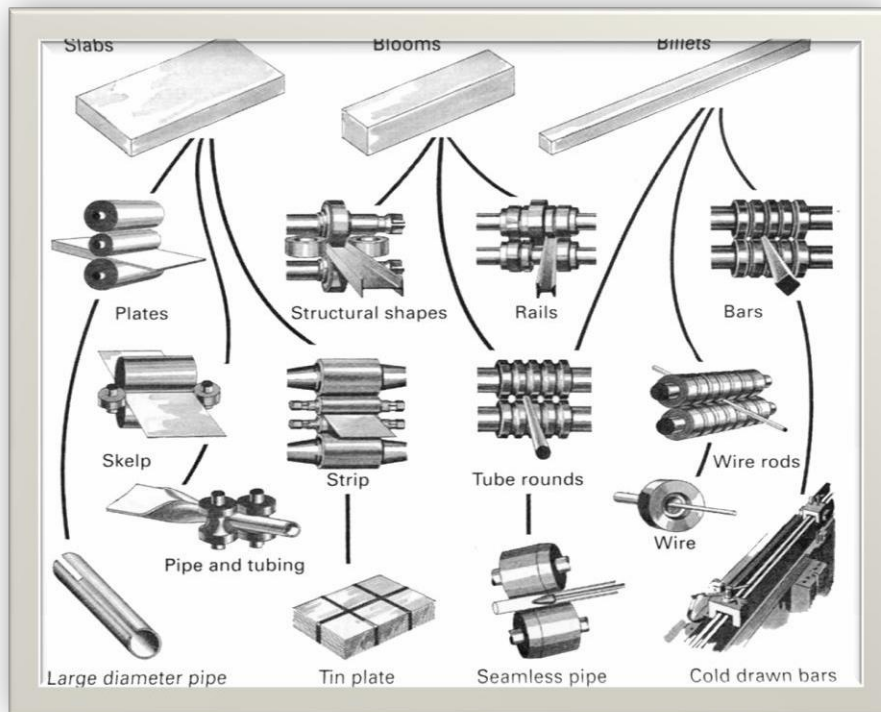


Με τα ράουλα μορφής έχουμε και την Έλαση Μορφής (structural shape rolling), κατά την οποία το τεμάχιο λυγίζει ή παραμορφώνεται σε συγκεκριμένο σχήμα και με συγκεκριμένη διατομή. Συνήθως χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση μεταλλικών σωληνώσεων διαφόρων σχημάτων (I,H,T,U beams), αν και μπορούμε να κατεργαστούμε και άλλα υλικά (πλαστικό, γυαλί κλπ). Αξίζει λοιπόν να δούμε λίγο πιο αναλυτικά την έλαση μορφής.

### 2.3. Περιγραφή της Έλασης Μορφής

Η έλαση μορφής (shape rolling), διαφέρει ως προς την απλή έλαση (πλάκας) ως προς την μορφή που δίνει στο τελικό προϊόν λόγω διαφορετικής γεωμετρίας ραούλων, όπως είδαμε και παραπάνω. Η εργαλειομηχανή δεν διαφέρει σε τίποτε άλλο πέρα από τα τύμπανα.

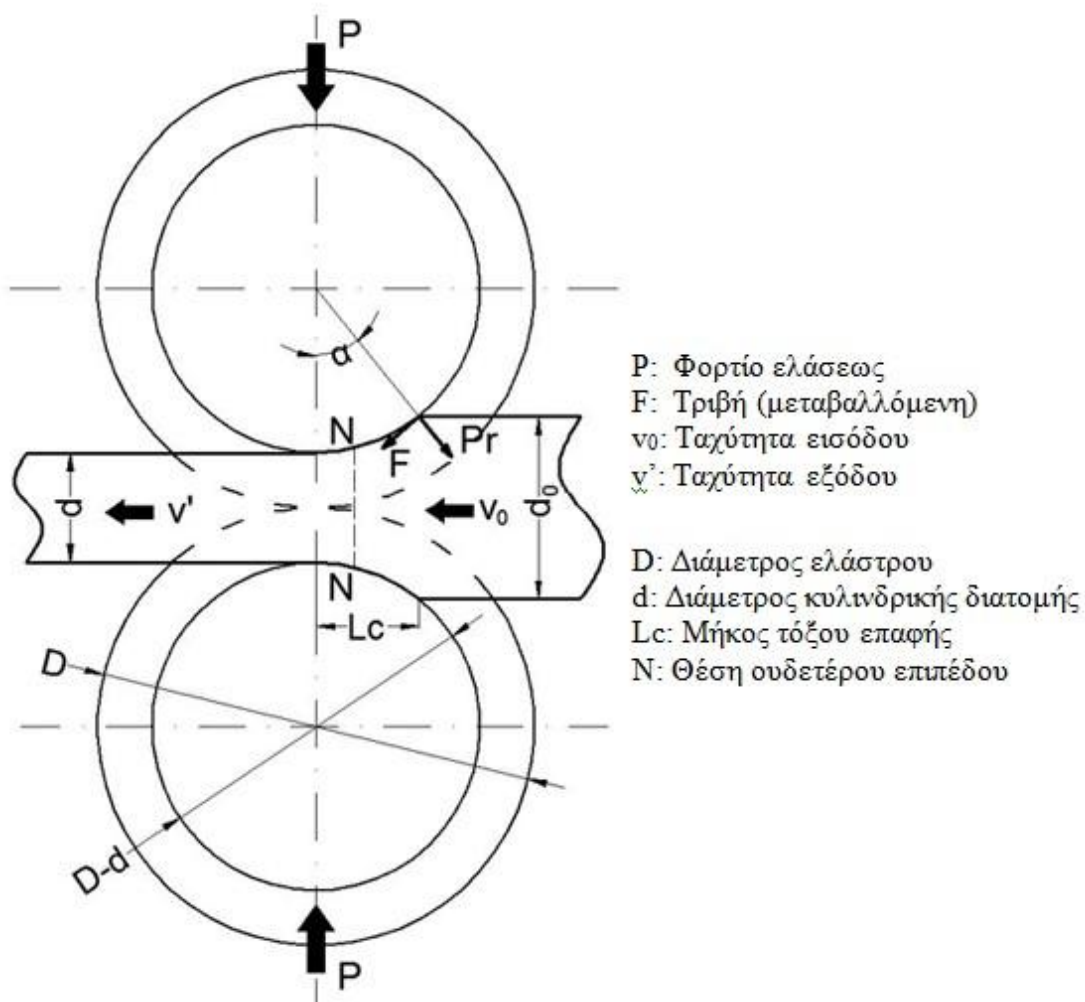
Χρησιμοποιείται για την παρασκευή δομικών ή μηχανολογικών εξαρτημάτων με ενιαία γεωμετρία στην διάμετρο, με πιο συνηθισμένες τις δοκούς κυλινδρικής, «H» και «T» διατομής. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε την έλαση μορφής ανάλογα με την γεωμετρία που έχει το κατεργασμένο κομμάτι, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα (σχ. 2.11).



Σχ. 2.11: Οι κυριότερες γεωμετρίες τεμαχίου που μπορεί να δώσει η έλαση μορφής.

Η έλαση μορφής που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία ήταν της κυλινδρικής (ή σωληνοειδούς) μορφής και ψυχρή. Αποτελεί μια γρήγορη και απλή μέθοδο κατασκευής κυλινδρικής μορφής τεμαχίων (tube rounds), μέχρι και την συρματοποίηση τους (wire rods).

Η μηχανική της έλασης μορφής αν και ομοιάζει με αυτήν της απλής έλασης, έχει κάποιες διαφορές. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν έχουμε μείωση πάχους και σταθερό πλάτος, αλλά ομοιόμορφη μείωση κυλινδρικής διατομής, σαν να μειώναμε ομοιόμορφα πάχος και πλάτος. Βάσει αυτής της παρατήρησης προκύπτει το παρακάτω σχήμα για την έλαση κυλινδρικής μορφής (σχ. 2.12), ενώ στη συνέχεια, βάσει του σχήματος και της βιβλιογραφίας, παρατίθενται τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη προσέγγιση ορισμένων μεγεθών κατά την έλαση μορφής.



Σχ. 2.12: Σχηματική παράσταση της μηχανικής που διέπει την έλαση κυλινδρικής μορφής.

Για τις ταχύτητες, λόγω συνέχειας, με μείωση της διατομής θα ισχύει  $v_0 < v'$ , με την  $v$  τού τεμαχίου να γίνεται ίση με την γραμμική ταχύτητα περιστροφής των ραούλων στο ουδέτερο επίπεδο.

Από τις δυνάμεις μπορούμε συνήθως να μετρήσουμε εύκολα την  $P$ , η οποία αποτελεί και το ακτινικό φορτίο της έλασης, η δύναμη δηλαδή που κρατάει τα ράουλα στην θέση τους όταν διαμορφώνεται το τεμάχιο ανάμεσά τους. Για την δύναμη της τριβής ισχύει η σχέση  $F = \mu P$ , όπου  $\mu$  ο συντελεστής τριβής μεταξύ τεμαχίου και τυμπάνων. Η  $F$  αυτή θα είναι αντίρροπη της κίνησης της ροής του υλικού, ενώ υπάρχει και η τριβή που προέρχεται από την περιστροφική κίνηση των ραούλων. Επομένως η συνισταμένη των δυνάμεων τριβής είναι αρχικά ομόρροπη (γι' αυτό το τεμάχιο τραβιέται ανάμεσα στα ράουλα), μέχρι το σημείο  $N$ , όπου αρχίζει να αντιτίθεται στην κίνηση.

Το μήκος τόξου επαφής ( $L_c$ ) τού τεμαχίου με τα τύμπανα βρίσκεται γεωμετρικά ότι υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_c \approx \sqrt{\frac{D - d_n}{2} (d_{n-1} - d_n)}$$

όπου  $D$  η διάμετρος του τυμπάνου,  $d_n$  η ελάχιστη διάμετρος του πάσου και  $d_{n-1}$  η διάμετρος του τεμαχίου πριν εισέλθει ανάμεσα στα τύμπανα. Η  $d_n$  δεν είναι η τελική διάμετρος τού τεμαχίου, καθώς έτσι θα παραλείπαμε την ελαστική παραμόρφωση.

Η τάση που αναπτύσσεται ακτινικά κατά την κατεργασία της έλασης κυλινδρικής μορφής (και που αποτελεί και την μεγαλύτερη) θα δίνεται προφανώς από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{P}{L_c d}$$

Όμως το  $d$  (η διάμετρος του τεμαχίου) δεν είναι σταθερή για το τεμάχιο κατά την διάρκεια της κατεργασίας, οπότε μόνο προσεγγιστικά μπορεί να υπολογισθεί.

Η ροπή για την ψυχρή έλαση μπορεί να υπολογιστεί από 2 τύπους, με τον 2<sup>ο</sup> να λαμβάνει υπόψιν του την τριβή και να είναι συνήθως ακριβέστερος ( $R$  η ακτίνα τού τυμπάνου).

$$T = 0,9 * P * L_c \quad \& \quad T = P * R * \mu$$

Τέλος, η μέση ισχύς (ίσως το σημαντικότερο μέγεθος στον σχεδιασμό και την οργάνωση ελάστρων στην βιομηχανία) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W = 4 * \pi * \lambda * L_c * P * N$$

### 3. Μέθοδος Powder in Tube (PIT) [1, 2, 5, 6, 10, 11, 13, 14, 17-28, 34-40]

#### 3.1. Περιγραφή Μεθόδου

Η τεχνική “Powder in Tube” (στο ελληνικό του: τεχνική «σκόνης μέσα σε σωλήνα»), ή σε συντομογραφία PIT, ανήκει στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά την διαμόρφωση των υλικών. Η μεθοδολογία είναι απλή: Σωλήνας από μεταλλικό υλικό πληρούται με σκόνη, νιφάδες ή αφρό οποιουδήποτε υλικού μας αφορά (μεταλλικό ή/και κεραμικό) και ακολουθεί μείωση της διατομής του με μηχανικές κατεργασίες έλασης ή διέλασης. Πριν την κατεργασία είναι πιθανό να έχει προηγηθεί συμπίεση του υλικού μέσα στον σωλήνα, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη γεωμετρία στο τελικό προϊόν και για να μειώσουμε την απώλεια σκόνης. Το τελικό προϊόν συνήθως είναι πάλι σωλήνας (δοκίμιο κυλινδρικής διατομής), αν και οι μορφές ενδέχεται να ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Η μορφοποίηση της σκόνης μέσα στον σωλήνα κατά την κατεργασία (κυρίως συμπίεση), καθώς και οι μηχανισμοί που την διέπουν αναλύονται στην παρακάτω ενότητα (4.2), εφόσον αποτελούν αντικείμενο της κonioμεταλλουργίας.

Η χρήση της μεθόδου PIT είναι απαραίτητη όταν θέλουμε να κατεργαστούμε μεγάλη ποσότητα σκόνης που μορφοποιείται δύσκολα, είτε λόγω υψηλού σημείου χύτευσης, είτε λόγω υψηλής σκληρότητας και ψαθυρότητας. Το τελικό προϊόν που θα πάρουμε ενδέχεται να είναι όλος ο σωλήνας με την σκόνη μέσα ή μόνο το εσωτερικό, οπότε και ο σωλήνας πρέπει να αφαιρεθεί. Συνήθως η μέθοδος PIT γίνεται όταν θέλουμε ενιαίο τον σωλήνα στο τέλος. Γι’ αυτό τα υλικά επιλέγονται για την μήτρα (σωλήνα) προσεκτικά βάσει των ιδιοτήτων τους. Τα μέταλλα που συνήθως χρησιμοποιούνται για τον σωλήνα είναι ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο άργυρος και ο χάλυβας. Στην διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε για το πείραμα μπιγιέτες αλουμινίου.

Η κατεργασία έλαση ή διέλαση, επιλέγεται βάσει του χρόνου, της ακρίβειας και των υλικών μας. Η έλαση (κυλινδρικές μορφές εφόσον θέλουμε σωληνοειδές τελικό προϊόν) είναι πιο άμεση και απλή εφόσον το στήσιμο της διάταξης γίνεται γρήγορα, χωρίς να είναι αναγκαία η κατασκευή μητρών. Παράλληλα με την έλαση είναι δυνατό να επιτύχουμε πιο γρήγορη μείωση της διατομής του σωλήνα, με λιγότερα πάσα. Όμως η διέλαση από την άλλη μεριά, δίνει συνήθως καλύτερα (με μεγαλύτερη ακρίβεια) αποτελέσματα.

Μέχρι την δεκαετία τού 70’, η μελέτη και ο σχεδιασμός της κατεργασίας (έλασης ή διέλασης) σε συνδυασμό με την μέθοδο PIT, ήταν περισσότερο τέχνη και λιγότερο επιστήμη. Επομένως ακόμα και σήμερα δεν υπάρχει σαφής τρόπος προσδιορισμού του τελικού προϊόντος πριν γίνει μελέτη με πειραματικά δεδομένα. Για παράδειγμα, το τελικό πάχος του μεταλλικού τοιχώματος του σωλήνα εξαρτάται από πολλές ιδιότητες

του μετάλλου και τις σκόνης (μέτρο ελαστικότητας, σκληρότητα, όριο διαρροής κλπ) ενώ παράλληλα εξαρτάται και από τις συνθήκες της κατεργασίας. Το ίδιο ισχύει για όλη σχεδόν την γεωμετρία τού τελικού προϊόντος και μόνο προσεγγίσεις μπορούν να γίνουν πριν ελεγχθεί στην πράξη η διαδικασία.

Η μέθοδος PIT εφόσον όπως είπαμε έχει να κάνει με μορφοποίηση σκόνης, βρίσκει χρήση σε ηλεκτρικές, μαγνητικές και μηχανικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, σήμερα στην βιομηχανία με αυτή την μέθοδο παράγονται μεγάλες ποσότητες υπεραγωγίμου σύρματος, το οποίο αποτελείται από μεταλλικό σωλήνα χαλκού ή αργύρου, ενώ το εσωτερικό είναι συνήθως από τον υπεραγωγό BSCCO (λόγω υψηλής  $T_c$ ). Υπεραγωγίμα σύρματα μικρότερης  $T_c$  αλλά πολύ φθηνότερα, όπως με  $MgB_2$  και  $Nb_3Sn$  παράγονται σε μικρότερη κλίμακα. Ακόμα η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή πολυπύρηνων συρμάτων (με κάποιον πυρήνα να είναι σε μορφή σκόνης) ή ακόμα και για υπερανθεκτικά και ελαφριά στηρίγματα σωληνοειδούς μορφής, όπως αναφέρεται στις εφαρμογές των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρακάτω (ενότητα

4.3). Γενικά οποιαδήποτε σκληρή σκόνη θέλουμε να μορφοποιήσουμε σε κυλινδρική συνήθως μορφή, ή όταν θέλουμε να παράγουμε πολυπύρηννα σύρματα, η μέθοδος PIT είναι από τις πλέον κατάλληλες, αρκεί να γνωρίζουμε ότι αποτελεί ακριβή λύση όπως συνήθως κάθε εφαρμογή της κονιομεταλλουργίας.

### **3.2. Κονιομεταλλουργία**

Η κονιομεταλλουργία αποτελεί μια από τις βασικές κατεργασίες για τη μορφοποίηση των μετάλλων. Άρχισε να εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα στη σύγχρονη εποχή στις αρχές του 20ου αιώνα, για συμπίεση σκόνης βολφραμίου (νηματίδια ηλεκτρικών λυχνιών) και σκληρών καρβιδίων (σκληρομέταλλα). Κατά την διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου αναπτύχθηκε περισσότερο η παραγωγή μεταλλικών αλλά και συνθέτων υλικών. Τις τελευταίες δεκαετίες η εξέλιξη της κονιομεταλλουργίας είναι πολύ μεγάλη με τη διαπίστωση των πολλών προτερημάτων της μεθόδου (καλύτερη χρησιμοποίηση και εκμετάλλευση του υλικού, ευκολία κατασκευής τεμαχίων, οικονομία σε ενέργεια και κατασκευαστικό κόστος κ.ά.) στη μαζική βιομηχανική παραγωγή.

Τα βασικά στάδια για την κατασκευή με κονιομεταλλουργία ανθεκτικών πολύπλοκων μορφών με ελάχιστο κόστος είναι:

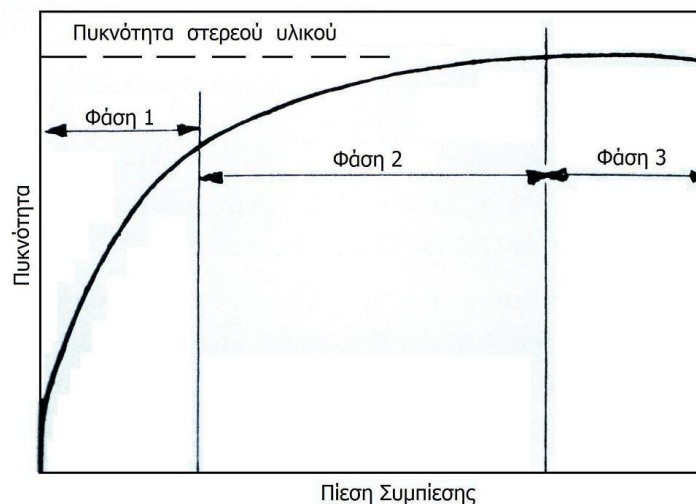
- Παραγωγή της σκόνης και τροφοδότησή της σε μία μήτρα
- Συμπίεσή της σε μια ορισμένη μορφή
- Θερμική κατεργασία (πυροσυσσωμάτωση)

Η κοκκομετρία των πρώτων υλών, καθώς επίσης και η ορθή τους ανάμειξη, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η παρασκευή των κατάλληλων σκονών γίνεται με χημικές (πχ αναγωγή οξειδίων, ηλεκτρόλυση) και φυσικές μεθόδους (πχ απόθεση από αέρια φάση, ψεκασμό). Αφού οι σκόνες αναμιχθούν σε κατάλληλους αναμικτήρες ώστε να επιτευχθεί ομοιογένεια, ακολουθεί η συμπίεση τους.

Το στάδιο όπου αναπτύσσονται πολλές τεχνικές και μέθοδοι, είναι η συμπίεση, καθώς το τελευταίο στάδιο (πυροσυσσωμάτωση) αποτελεί συνήθως μια απλή θερμική κατεργασία. Η συμπίεση λοιπόν μπορεί να γίνει σχεδόν με όλες της κατεργασίες μορφοποίησης (έλαση, σφυρηλάτηση, διέλαση) και πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις, που κάθε μια χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερο μηχανισμό:

- Μεταβατική φάση (διακίνηση, ανακατάταξη και σύμπλεξη των κόκκων της σκόνης (transitional restacking)).
- Πλαστική παραμόρφωση των κόκκων (plastic deformation).
- Ψυχρή κατεργασία με ή χωρίς μοριακή θραύση (cold working with or w/o particle fragmentation).

Η σχέση μεταξύ της επιβαλλόμενης πίεσης για την συμπίεση και του πορώδους του συμπιέσματος που επιτυγχάνεται για κάθε φάση, δίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ.3.1). Βλέπουμε ότι η πίεση αυξάνει σχεδόν εκθετικά συναρτήσει της πυκνότητας που θέλουμε να επιτύχουμε.



Σχ. 3.1: Η (φαινόμενη) πυκνότητα του συμπιέσματος συναρτήσει της επιβληθείσας πίεσης.

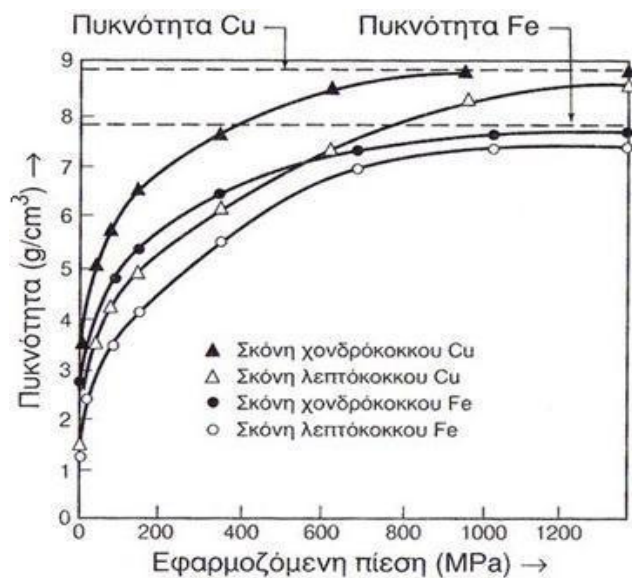
Στη μεταβατική φάση η συνένωση της σκόνης είναι το αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των κόκκων μεταξύ τους και της ανακατάταξής τους. Η κίνηση των κόκκων από

φαινόμενα εσωτερικής τριβής μεταξύ των μορίων. Η μεταβατική φάση τελειώνει όταν η επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση (φορτίο εργαλειομηχανής) αποκτήσει μία τιμή ώστε οι τάσεις που αναπτύσσονται από τον σχηματισμό στερεών δεσμών μεταξύ των μορίων και η εσωτερική τριβή επιβραδύνουν τη σχετική κίνηση των κόκκων και προκαλούν τη γεωμετρική τους σύμπλεξη.

Ανάλογα με το είδος της σκόνης που συμπιέζεται, την μεταβατική φάση ακολουθεί μια φάση συμπίεσης κατά την οποία οι κόκκοι παραμορφώνονται πλαστικά, συμφύονται και η επιφάνεια επαφής αυξάνει. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο κενός χώρος και επομένως επιτυγχάνεται η μείωση του πορώδους. Η μεταφορά μάζας διευκολύνεται από γραμμικές ατέλειες (διαταραχές) στην μάζα του υλικού, οι οποίες οφείλονται είτε στην πλαστική του παραμόρφωση, είτε συνοδεύουν την ενδοκρυσταλλική διάχυση. Έτσι παρατηρείται πρώτα κλείσιμο και ύστερα στρογγύλευση των πόρων κατά την αύξηση της πυκνότητας του συμπιέσματος.

Το τρίτο και τελικό στάδιο της συμπίεσης συνήθως αποδίδεται σε ψυχρή κατεργασία των κόκκων ή μοριακή φθορά. Σε ορισμένες περιπτώσεις και οι δύο αυτοί μηχανισμοί επηρεάζουν τη συμπίεση.

Η φαινόμενη πυκνότητα τού συμπιέσματος (προφανώς μικρότερη ή το πολύ ίση με την πυκνότητα συμπαγούς υλικού) εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη πίεση και την κοκκομετρία των πρώτων υλών (σχ. 3.2). Όπως είδαμε και παραπάνω, για χαμηλές πιέσεις η πυκνότητα αυξάνεται σημαντικά και όσο η πίεση μεγαλώνει, ο ρυθμός αύξησης της πυκνότητας μειώνεται. Το σημαντικό όμως είναι ότι όσο μεγαλύτερους κόκκους έχει η σκόνη, τόσο γρηγορότερα συμπιέζεται και κυρίως, τόσο περισσότερο τείνει η πυκνότητα του συμπιέσματος σε αυτήν του συμπαγούς υλικού.



Σχ. 3.2: Μεταβολή της (φαινόμενης) πυκνότητας συμπιεσμάτων Cu και Fe, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πίεσης και της κοκκομετρίας .

Η επίτευξη μικρού πορώδους όμως δεν εξαρτάται μόνο από το επιβαλλόμενο φορτίο αλλά και από την ίση κατανομή των διατμητικών τάσεων μέσα σε όλο το συμπίεσμα. Για (φαινόμενη) πυκνότητα συμπίεσματος μέχρι 90% απαιτείται ελάχιστος χρόνος (της τάξεως του δευτερολέπτου) για μικρά σχετικά αντικείμενα. Το φορτίο που μπορεί να αναπτυχθεί κατά την συμπίεση από την εργαλειομηχανή (πρέσα, έλαστρο κλπ) είναι συνήθως μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες τόνοι ενώ μπορεί να φτάσει και αρκετούς χιλιάδες τόνους.

Πρέπει να τονισθεί ότι η σκόνη κατά την συμπίεση δεν συμπεριφέρεται σαν ρευστό υλικό, λόγω της ύπαρξης μοριακών δυνάμεων τριβής μεταξύ των κόκκων και των δυνάμεων τριβής στις επιφάνειες επαφής της σκόνης με την μήτρα ή και την εργαλειομηχανή. Η περιορισμένη αυτή ροή της σκόνης λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό της μήτρας, κυρίως για λεπτότοιχα και μεταβλητής διατομής αντικείμενα, ώστε το απαιτούμενο ποσό της σκόνης να τοποθετείται στην κατάλληλη θέση. Επιπλέον, επειδή η πίεση εφαρμόζεται κυρίως μονοαξονικά, είναι αναγκαίο να προβλεφθεί η εξόλκευση του συμπίεσματος από την μήτρα.

Τέλος, κατά την μονοαξονική συμπίεση (που είναι και η πλέον συνηθισμένη και απλή) δεν έχουμε ομοιόμορφη συμπίεση όλων των σημείων της μάζας του υλικού και επομένως το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας είναι:

- Η οικονομική μορφοποίηση σκληρών και δύστηκτων υλικών (πχ καρβίδια, πυρίμαχα μέταλλα, υπερκράματα), τα οποία θα απαιτούσαν τεράστια ποσά ενέργειας και θα είχαν πιθανόν προβλήματα στις κατεργασίες τους με συμβατικές μεθόδους λόγω μικρής πλαστικότητας και ελαττωμάτων κατά την τήξη τους.
- Η δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων διαφόρων μεγεθών με ακρίβεια ανοχών πολύ κοντά στην τελική μορφή (επομένως μικρή ή σχεδόν καθόλου κατεργασία αποπεράτωσης), με αποτέλεσμα την ελάχιστη απώλεια υλικού και την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Η επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας και βάρους του τεμαχίου (μεταβλητό πορώδες ανάλογα με τις απαιτήσεις).

Με τεχνικές κονιομεταλλουργίας, βάσει των παραπάνω πλεονεκτημάτων, γίνεται δυνατή και οικονομική η παραγωγή:

- Νηματιδίων λυχνιών και ηλεκτρικών αντιστάσεων από πυρίμαχα μέταλλα, όπως W, Mo, Ta και Nb.
- Πολύ σκληρών κραμάτων για εργαλεία κοπής, πτερυγίων στροβίλων κλπ, από πρώτες ύλες W, Ti, Ta, καρβίδια ή αδάμαντα.
- Αντιτριβικών κραμάτων χαμηλού πορώδους, ή μεταλλικών φίλτρων υψηλού πορώδους.
- Μετάλλων υψηλής καθαρότητας, όπως σιδήρου μαγνητικών εφαρμογών.
- Αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας των οποίων η μορφοποίηση με κατεργασία κοπής θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα.



Τα μειονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας είναι κυρίως το κόστος της σκόνης (μέχρι και το διπλάσιο από αυτό του στερεού υλικού) και το μεγάλο κόστος τού εξοπλισμού και της προετοιμασίας των προς κατεργασία υλικών.

### **3.3. Υλικά και Εφαρμογές**

Όπως είδαμε στην περιγραφή της μεθόδου PIT, τα υλικά είναι μεταλλικά για τον σωλήνα και η σκόνη μπορεί να είναι σχεδόν οτιδήποτε. Φυσικά συνήθως προτιμάται να μορφοποιείται σκόνη που είναι πολύ ψαθυρή και με μεγάλο σημείο τήξης, αλλιώς θα επιλεγόταν μια πιο φθηνή μέθοδος, όπως η χύτευση.

Θα γίνει μια αναφορά στα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη και τον λόγο που έγινε η επιλογή τους. Θα εξετάσουμε λοιπόν κάποια γενικά χαρακτηριστικά τους και μερικές εφαρμογές που έχουν αυτά κατά την χρήση τους στην κονιομεταλλουργία και κυρίως όταν παράγονται με την μέθοδο PIT.

#### **3.3.1. Μέταλλα**

Ο κύριος ορισμός των μετάλλων σχετίζεται με τις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες των «μεταλλικών σωμάτων» σε στερεά κατάσταση. Επομένως τα υλικά που έχουν «μεταλλικό χαρακτήρα», παρουσιάζουν ομοιότητα επί τη βάσει των περισσοτέρων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τους. Αυτές οι ιδιότητες οφείλονται στην ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων τους και στην ιδιαιτερότητα των δεσμών (μεταλλικοί δεσμοί), με τις σπουδαιότερες να φαίνονται παρακάτω:

- Είναι στερεά (εκτός τού Hg) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Έχουν σχετικά υψηλή πυκνότητα
- Είναι καλή αγωγοί θερμότητας και ηλεκτρισμού
- Είναι όλκιμα και επομένως κατεργάζονται εύκολα
- Είναι λευκού χρώματος (εκτός από Cu και Au) αφού ανακλούν όλα τα μήκη κύματος

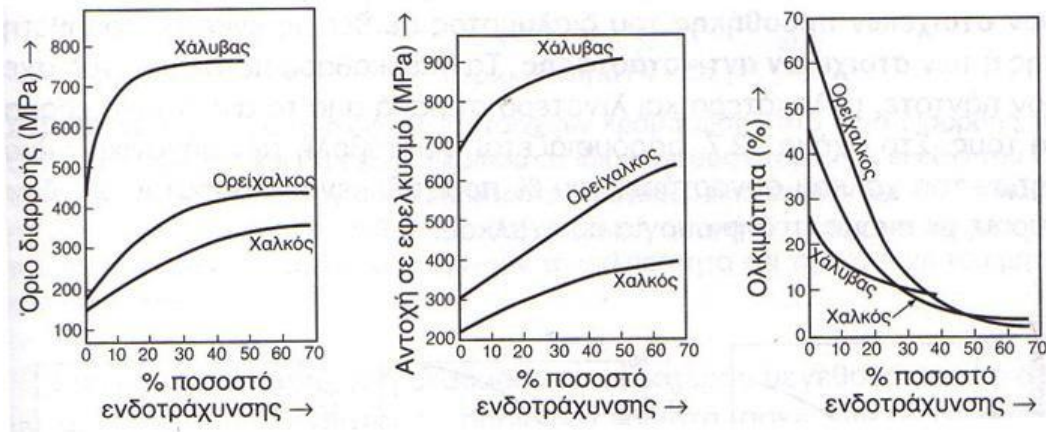
Οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων δεν εξαρτώνται μόνο από το υλικό, αλλά και από το ποσοστό ενδοτράχυνσής τους. Εφόσον η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε κατεργασία διαμόρφωσης, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε πιο διεξοδικά σε αυτό το φαινόμενο.

Η ενδοτράχυνση (ή εργοσκλήρυνση) παρουσιάζεται ως φαινόμενο όταν τα μέταλλα υφίστανται μηχανικές καταπονήσεις και οδηγεί σε σκλήρυνση του υλικού. Μπορεί να οριστεί ως εν ψυχρώ πλαστική παραμόρφωση του υλικού που οφείλεται στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Αυτές οι εσωτερικές τάσεις δημιουργούνται από το ότι οι διαταραχές στο εσωτερικό του υλικού τέμνονται μεταξύ τους κατά την κατεργασία και εμποδίζουν η μία την μετακίνηση της άλλης. Η συνεισφορά της ενδοτράχυνσης στην παρεμπόδιση κίνησης των διαταραχών αυξάνεται με την παραμόρφωση.

Μετά την εν ψυχρώ κατεργασία τους, τα μέταλλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα, υψηλότερα όρια διαρροής και θραύσης, μικρότερη πλαστικότητα και δυσθραυστότητα, δηλαδή γίνονται πιο σκληρά και ψαθυρά με πιθανό αποτέλεσμα την ρωγμάτωσή τους, πράμα που καθιστά συνήθως την ενδοτράχυνση ανεπιθύμητη. Όταν για παράδειγμα το υλικό υποβάλλεται σε έλαση ή διέλαση, η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης μπορεί να αυξηθεί τόσο που η τάση διαρροής να πάρει τιμές που να είναι ανάγκη να γίνει ενδιάμεση ανόπτηση, η οποία είναι η μέθοδος που αποκαθιστά σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της ενδοτράχυνσης.

Κατά την διαμόρφωση του μετάλλου, όπως η έλαση, οι κόκκοι του υλικού παραμορφώνονται, επιμηκνόμενοι κατά την διεύθυνση της έλασης. Μακροσκοπικά το υλικό γίνεται ανισότροπο, όμως κάθε κόκκος διατηρεί συνεχή κρυσταλλική δομή, με αποτέλεσμα τα όρια των κόκκων να παραμορφώνονται αλλά ο κόκκος να διατηρεί τον όγκο του. Μικροσκοπικά, οι παραμορφωμένοι κόκκοι μετά την κατεργασία, τείνουν να αποκτήσουν το αρχικό σχήμα τους αλλά κατά διαφορετικά ποσοστά για όλη τη σύσταση του υλικού, επειδή η παραμόρφωση του υλικού δεν είναι ομοιογενείς, πράμα που οδηγεί στις εσωτερικές μηχανικές τάσεις που αναφέραμε.

Η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερος, φαίνεται συνοπτικά για διάφορα υλικά στο παρακάτω σχήμα, συναρτήσεως του ποσοστού ενδοτράχυνσης, το οποίο είναι ανάλογο της παραμόρφωσης που έγινε κατά την κατεργασία. (σχ. 3.3)



Σχ. 3.3: Η επίδραση του ποσοστού ενδοτράχυνσης στις κυριότερες μηχανικές ιδιότητες ορισμένων μετάλλων.

Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται κατά την μέθοδο PIT κατά κύριο λόγο ως το υλικό του σωλήνα, λόγω καλής κατεργασιμότητας. Όμως κάποια από αυτά (κυρίως τα ελαφριά) ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν και σε μορφή σκόνης ή νιφάδων ως υλικό ανάμειξης με την κύρια σκόνη που κατεργαζόμαστε, ώστε το δείγμα να γίνει:

- Ελαφρύτερο
- πιο κατεργάσιμο και
- με καλύτερη πρόσφυση με το τοίχωμα του σωλήνα.

Παρακάτω αναλύεται το αλουμίνιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της μπιγιέτας (Al) καθώς και το διβορίδιο του μαγνησίου το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως σκόνη. Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε καθώς κρίθηκε ικανό να αντέξει στην διέλαση λόγω μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού ενώ το διβορίδιο του μαγνησίου ( $MgB_2$ ) χρησιμοποιήθηκε λόγω των υπεραγωγίων ιδιοτήτων του.

### 3.3.2 Αλουμίνιο (Al)

Το αλουμίνιο (Al) ανήκει στην ομάδα IIIA (13) του περιοδικού συστήματος και έχει ατομικό αριθμό 13. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο (3ο) πιο άφθονο χημικό στοιχείο στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο και βρίσκεται σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου αυτού είναι ο βωξίτης.

Το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα και η πυκνότητά του είναι ίση με  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . Το σημείο τήξης του είναι περίπου  $660^\circ\text{C}$  και το σημείο ζέσεως κοντά στους  $2520^\circ\text{C}$ . Μαζί με το Mg και το Ti, ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων.

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για την βιομηχανία είναι το χαμηλό ειδικό του βάρος ( $2698.9 \text{ kg/m}^3$  στους  $20^\circ\text{C}$ ), η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις (ειδικά συναρτήσει του βάρους του, με υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και ειδική μηχανική αντοχή) και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση. Η υψηλή του αντιδιαβρωτική ικανότητα οφείλεται στην μεγάλη του χημική συγγένεια με το οξυγόνο, οπότε αν αφεθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως σχηματίζοντας ένα λεπτό, επιφανειακό και συνεχές στρώμα  $Al_2O_3$ , το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία (φαινόμενο της παθητικοποίησης).

Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την αεροναυπηγική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεών του.

Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο και παρουσιάζει καλή κατεργασιμότητα. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Χαρακτηρίζεται επίσης από πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, έχοντας το 62% της αγωγιμότητας του χαλκού, με μικρότερο ειδικό βάρος και χαμηλότερο κόστος παραγωγής απ' αυτόν.

Συγκεντρωτικά, βλέπουμε παρακάτω τις κυριότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου και το εύρος που αυτές έχουν ανάλογα με το κράμα:

#### Αλουμίνιο

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | 2,7 g/cm <sup>3</sup> |
| Θερμοκρασία Τήξης          | 660°C                 |
| Μέτρο Ελαστικότητας        | 50-100 GPa            |
| Μέτρο Διάτμησης            | 26 GPa                |
| Όριο Συμπίεστότητας        | 76 GPa                |
| Λόγος Poisson              | 0,35                  |
| Όριο Διαρροής              | 40-300 MPa            |
| Όριο Θραύσης               | 80-400 MPa            |

Εκτός από τις γενικές εφαρμογές (αεροναυπηγικές, κατασκευαστικές, ηλεκτρικές κ.ά.), το αλουμίνιο είναι ένα από τα βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως σωλήνες

κατά την μέθοδο PIT, το πιο ελαφρύ αν και το λιγότερο όλκιμο. Χρησιμοποιείται κυρίως για μορφοποίηση σκληρών κεραμικών σκονών, τις περισσότερες φορές καρβιδίων, με απώτερο σκοπό την χρήση του τελικού προϊόντος μαζί με τον σωλήνα, για παράδειγμα ως ελαφρύ και γερό στήριγμα κινητήρων αυτοκινήτων και αεροσκαφών. Γενικά, το αλουμίνιο ως λιγότερο όλκιμο από τον χαλκό, δεν αντέχει σε μεγάλες μειώσεις διατομών και μεγάλα φορτία, γι' αυτό κατά την κατεργασία (έλαση ή διέλαση) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες (δύναμη, ταχύτητα κλπ) που αυτή γίνεται.

Παράλληλα, αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση νιφάδων (flakes), αφρού (foam) ή σκόνης (powder) αλουμινίου ως συστατικό πλήρωσης του αλουμινένιου σωλήνα μαζί με το κύριο συστατικό κονιομεταλλουργίας κατά την μέθοδο PIT, οδηγεί σε πολύ καλύτερη πρόσφυση του τελικού προϊόντος του σωλήνα με το τοίχωμα του σωλήνα. Αυτό συμβαίνει καθώς το αλουμίνιο μέσα στον σωλήνα κατά κάποιον τρόπο αλληλεπιδρά (interaction effect) και σχηματίζει δεσμούς με το εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα, δημιουργώντας καλύτερες συνδέσεις σκόνης-μήτρας. Τέλος, το μικρό βάρος του αλουμινίου οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του βάρους με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όταν η σκόνη που θέλουμε να μορφοποιήσουμε αναμειγνύεται με αλουμίνιο στις παραπάνω μορφές και ταυτόχρονα η μορφοποίηση γίνεται ευκολότερη.

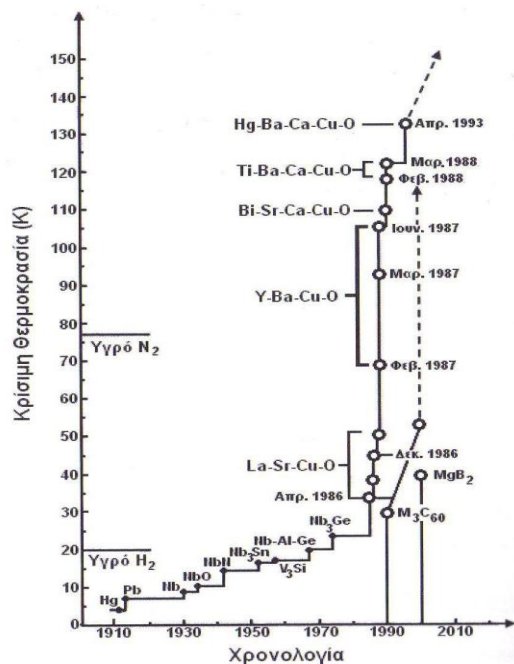
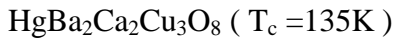
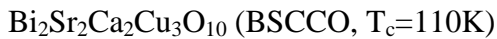
### **3.3.3. Υπεραγωγοί**

#### **3.3.3.1. Γενικά**

Με τον όρο υπεραγωγιμότητα ορίζεται η ξαφνική και απόλυτη απώλεια αντίστασης σε μερικά υλικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, η οποία οφείλεται στην ανταλλαγή φωτονίων μεταξύ ζευγών ηλεκτρονίων. Η θερμοκρασία κάτω από την οποία εμφανίζεται η υπεραγωγιμότητα, είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό και ονομάζεται θερμοκρασία μεταβάσεως ή κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$ .

Η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Ολλανδό φυσικό Heike Kamerlingh Onnes, τρία χρόνια αφού κατάφερε και υγροποίησε το ήλιο, γεγονός το οποίο του έδωσε την ικανότητα και την τεχνική ψύξης ώστε να επιτύχει κρυογενικές θερμοκρασίες μερικών μόλις βαθμών Kelvin. Καθώς ο Onnes και ένας βοηθός του μελετούσαν την ειδική αντίσταση του καθαρού υδραργύρου σε χαμηλές θερμοκρασίες, παρατήρησαν ότι η αντίστασή του έπεφτε απότομα και γινόταν πρακτικά μηδενική για κάθε θερμοκρασία κάτω από τους 4,15K. Έτσι στις δύο μέχρι τότε γνωστές κατηγορίες υλικών, αγωγούς και μονωτές, ερχόταν να προστεθεί μια νέα κατηγορία με πρωτόγνωρες ιδιότητες, αυτή των υπεραγωγών. Στο πεδίο όμως της κατανόησης της υπεραγωγιμότητας είχε γίνει πολύ μικρή πρόοδος μέχρι που το 1933 οι W. Hans Meissner και R. Ochsenfeld μελέτησαν τις μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών και ανακάλυψαν ένα απρόσμενο και βασικό φαινόμενο, το διαμαγνητικό (περισσότερη ανάλυση παρακάτω).

Από τότε μέχρι και τη δεκαετία του '80 το θέμα της υπεραγωγιμότητας επιβραδύνθηκε λόγω του ότι για να παρατηρηθεί το φαινόμενο αυτό, έπρεπε το υλικό να ψυχθεί σε περιοχές της τάξης των 2-7K με υγρό ήλιο, υλικό σπάνιο και πολύ ακριβό, ή με υγρό υδρογόνο, που όμως είναι ιδιαίτερος εκρηκτικό. Παράλληλα γίνονταν προσπάθειες δημιουργίας νέων ενώσεων με όσο το δυνατόν υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$ , κάτι το οποίο επιτυγχάνεται το 1986, με την ανακάλυψη ενώσεων με κρίσιμη θερμοκρασία άνω των 77K (θερμοκρασία υγροποίησης του αζώτου). Οι νέες αυτές ενώσεις ονομάστηκαν υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature Superconductors H.T.S.), είναι ως επί το πλείστον οξειδία με κρυσταλλική δομή περοβσκίτη, μονωτές του ηλεκτρισμού σε ΚΣ και οι πιο γνωστοί και εμπορικοί από αυτούς είναι:



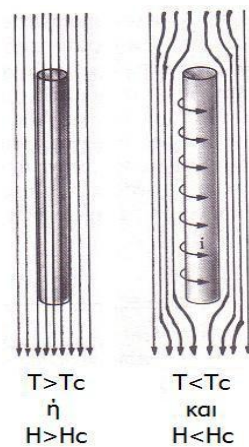
Σχ. 3.4: Χρονολόγιο της ανακάλυψης των κυριότερων υπεραγωγών.

Το διαμαγνητικό φαινόμενο που αναφέρθηκε παραπάνω, εμφανίζεται όταν ένα υλικό με υπεραγωγικές ιδιότητες ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη της  $T_c$ , με την επιβολή σε αυτόν ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ( $H < H_c$ ) μηδενίζεται η ολική μαγνητική ροή  $\Phi$  σε αυτό (γνωστό και ως φαινόμενο Meissner-Ochsenfeld) (σχ. 3.9).

Η συναρτησιακή εξάρτηση του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου  $H_c$  από τη θερμοκρασία έχει εμπειρικά βρεθεί ότι ακολουθεί με ικανοποιητικά καλή προσέγγιση την παρακάτω παραβολική σχέση:

$$H_c = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T^2}{T_c^2} \right) \right]$$

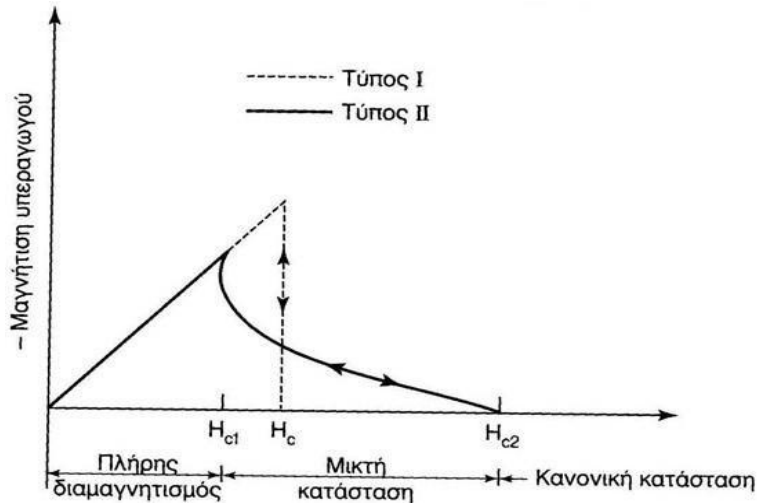
όπου  $H_0$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε θερμοκρασία 0K



Σχ. 3.5: Διαμαγνητικό φαινόμενο, όπου το μαγνητικό πεδίο αποβάλλεται από το υλικό όταν αυτό γίνεται υπεραγωγίμο, λόγω ανάπτυξης επιφανειακών δινορευμάτων.

Με βάση την διαμαγνητική συμπεριφορά λοιπόν, οι υπεραγωγοί μπορούν να διακριθούν σε 2 κατηγορίες (τύπος I & II):

- Υπεραγωγοί τύπου I. Παρουσιάζουν την συμπεριφορά που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή υπεραγωγίμη συμπεριφορά όταν  $T < T_c$  και  $H < H_c$ .
- Υπεραγωγοί τύπου II. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται δύο κρίσιμες τιμές μαγνητικού πεδίου  $H_{c1}$  και  $H_{c2}$ . Για  $H < H_{c1}$ , παρατηρείται το διαμαγνητικό φαινόμενο, για  $H_{c2} > H > H_{c1}$ , αρχίζει η σταδιακή διείσδυση του μαγνητικού πεδίου (δημιουργία ενδιάμεσης κατάστασης) και για  $H > H_{c2}$  γίνεται 100% εισχώρηση του μαγνητικού πεδίου στο υλικό με απότοκο την καταστροφή της υπεραγωγιμότητάς του.



Σχ. 3.6: Καμπύλες μαγνήτισης για τους 2 τύπους υπεραγωγών, με την επιφάνεια κάτω από τις 2 καμπύλες μαγνήτισης να είναι ίδιας όταν έχουν ίδια διαφορά ελεύθερης ενέργειας μεταξύ υπεραγωγίμης και κανονικής κατάστασης.

Η ερμηνεία της υπεραγωγιμότητας γίνεται καλύτερα με την θεωρία BCS, με την κεντρική ιδέα να είναι ο σχηματισμός δέσμιων καταστάσεων μεταξύ ζευγών ηλεκτρονίων, γνωστά ως ζεύγη Cooper, υπό την έμμεση επίδραση μιας έλξης. Η έμμεση επίδραση μίας έλξης λέγεται διότι όπως είναι γνωστό, τα ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία απωθούνται. Όμως, με έναν συγκεκριμένο μηχανισμό που συστήνει η θεωρία BCS και που θα αναπτυχθεί παρακάτω, θα δούμε πως το τελικό αποτέλεσμα είναι να αναπτύσσεται μία έλξη μεταξύ τους της οποίας ενδιάμεσος φορέας είναι το πλέγμα του υλικού.

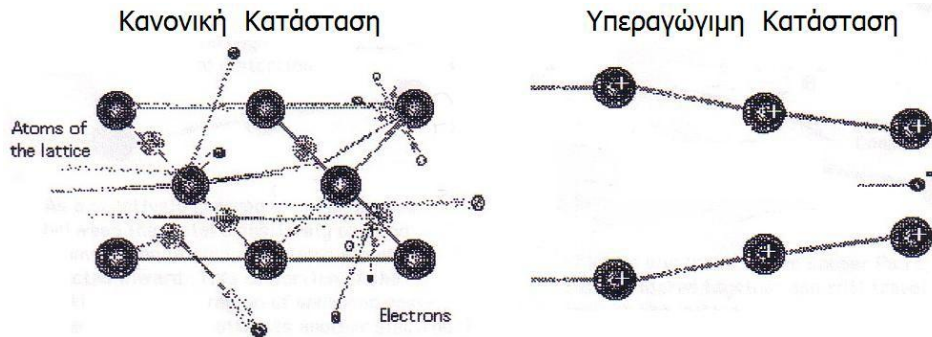
Ως γνωστό, σε θερμοκρασία δωματίου, το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού δεν είναι ακίνητο αλλά, λόγω απορρόφησης της θερμικής ενέργειας, ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας του. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, η συχνότητα ταλάντωσης παραμένει η ίδια, αλλά το πλάτος ή αλλιώς η απόσταση στην οποία φθάνει το ιόν από τη θέση ισορροπίας μειώνεται και σε θερμοκρασίες της τάξης των μερικών Kelvin όπου έχουμε το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, η ταλάντωση του πλέγματος είναι σχεδόν μηδαμινή. Έτσι, κατεβαίνοντας τον άξονα της θερμοκρασίας, έχουμε σιγά-σιγά τον σχηματισμό αγωγίμων οδών μέσα στον μονοκρυστάλλο του υλικού όπου το πλέγμα δεν παρεμβάλλεται και οι σκεδάσεις των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους στις διευθύνσεις αυτές είναι θεωρητικά μηδαμινές.

Θα έλεγε κάποιος ότι αυτό είναι αρκετό για την εξήγηση της μηδενικής αντίστασης της υπεραγωγιμότητας, παρόλα αυτά όμως θα παρέμενε αναπάντητη η απότομη μετάβαση στην κατάσταση αυτή, καθώς δεν είναι γραμμική όπως προβλέπει ο νόμος του Ohm, ενώ παραμένουν ανεξήγητα τα παραμένοντα υπεραγωγίμα ρεύματα και το φαινόμενο Meissner.

Όταν λοιπόν ένα ηλεκτρόνιο κινηθεί στην διεύθυνση των υπεραγωγίμων αυτών οδών που 'σχηματίζονται' ενδιάμεσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, τότε λόγω αμοιβαίας έλξης του ηλεκτρονίου με τα εκατέρωθέν του ιόντα του πλέγματος,



τα αναγκάζει στην στιγμιαία εγκατάλειψη των θέσεων ισορροπίας τους και στη σύγκλιση τους προς τη μεριά του ηλεκτρονίου.



Σχ. 3.7: Η αντίσταση που προβάλλει το πλέγμα στην κίνηση των ηλεκτρονίων στην κανονική κατάσταση και πως αυτό παραμορφώνεται στην υπεραγώγιμη.

Το αποτέλεσμα είναι ότι στην παραμορφωμένη περιοχή του πλέγματος δημιουργείται εντελώς τοπικά μία περίσσεια θετικού φορτίου. Έτσι, όταν ένα άλλο ηλεκτρόνιο, το οποίο τυγχάνει να βρίσκεται στην ίδια υπεραγώγιμη οδό, πλησιάζει σε ικανοποιητική απόσταση προτού προλάβουν και επανέλθουν τα ιόντα του πλέγματος στις αρχικές θέσεις ισορροπίας τους, τότε έλκεται από την περίσσεια ηλεκτρικού φορτίου που υπάρχει εκεί. Δημιουργείται δηλαδή μία καθυστερημένη ελκτική δύναμη ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόνια η οποία δρα μέσω των θετικών ιόντων του πλέγματος και ωθεί στιγμιαία το δεύτερο ηλεκτρόνιο προς τη διεύθυνση του πρώτου. Το πρώτο μέλος του ζεύγους Cooper ακολουθεί την πορεία που αναφέρθηκε, καθώς κατά την διεύθυνση αυτή δεν συναντά αντίσταση λόγω της μορφολογίας του πλέγματος.

Όπως είναι κατανοητό, η κρυσταλλική μορφή του πλέγματος, η διάταξη των ιόντων στο χώρο δηλαδή, παίζει καταλυτικό και μείζονος σημασίας ρόλο στην ικανότητα ενός υλικού να μεταβεί σε υπεραγώγιμη κατάσταση. Ο σχηματισμός δηλαδή υπεραγώγιμων οδών κατά τις οποίες οι σκεδάσεις των ηλεκτρονίων είναι μηδαμινές, δεν είναι δυνατός σε όλα τα υλικά.

Η παραγωγή υπεραγώγιμων υλικών περνά από δύο διαδοχικές φάσεις:

- A. τη σύνθεση της υπεραγώγιμης σκόνης
- B. παραγωγή και μορφοποίησή της προκειμένου να ληφθεί το προϊόν στην τελική του μορφή

#### A. Σύνθεση υπεραγώγιμης σκόνης

Η σύνθεση της υπεραγώγιμης σκόνης μπορεί να γίνει με μία από τις παρακάτω τεχνικές

1. Πυροσυσσωμάτωση σε στερεά κατάσταση ( Sintering )

2. Μέθοδος συγκαταβύθισης ( Cop recitation method )

3. Τεχνική Sol-Gel ( Sol-Gel technique)

**1. Πυροσυσσωμάτωση σε στερεά κατάσταση(sintering)**

Πρόκειται για θερμική κατεργασία όπου η πύρωση του συμπιέσματος επιτελείται σε κλίβανο με προστατευτική ατμόσφαιρα(αναγωγική ατμόσφαιρα υδρογόνου ή CO) σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης ΣΜ του βασικού μετάλλου(0.7-0.75 ΣΜ) και διαρκεί 9 με 16 ώρες. Είναι πιθανόν να πραγματοποιηθεί κάποια τήξη ή πυροσυσσωμάτωση στη ρευστή κατάσταση σε κάποια από τα συστατικά, όπως πχ μπορεί να συμβεί κατά την πυροσυσσωμάτωση σιδηρούχων κόνεων που αναμειγνύονται με χαλκό στην παραγωγή υπέρσκληρων καρβιδίων βολφραμίου, όπου ως συνδετική ύλη στην κόνη των καρβιδίων προστίθεται 3-20% κόνη βολφραμίου. Μετά τη συμπίεση ακολουθεί πυροσυσσωμάτωση στους 1350-1500οC ,πλην όμως στους 1130ο C εμφανίζεται ήδη ρευστή φάση του κοβαλτίου και σχηματίζεται ένα ευτηκτικό μείγμα.

Με την πυροσυσσωμάτωση αναπτύσσονται ισχυρές μεταλλουργικές συνδέσεις ανάμεσα στους κόκκους της κόνης και ταυτόχρονα ,αυξάνεται ελαφρά η φαινόμενη πυκνότητα, ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του συμπιέσματος. Ένα σημαντικό στάδιο στην πυροσυσσωμάτωση είναι η αποκήρωση ή το «κάψιμο»(αποβολή) του λιπαντικού. Αυτό συμβαίνει σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία και προηγείται της κύριας φάσης της πυροσυσσωμάτωσης.

Μετά την πυροσυσσωμάτωση ακολουθεί θερμική κατεργασία της σκόνης γύρω στους 900ο C σε ατμόσφαιρα οξυγόνου ,προκειμένου να αναπληρωθούν οι απώλειες οξυγόνου στον κρύσταλλο.

**2. Μέθοδος συγκαταβύθισης (coprecitation method).**

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο αντίδρασης στερεάς κατάστασης, στη μέθοδο συγκαταβύθισης ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα νιτρικών, όχι ανθρακικών αλάτων των στοιχείων που θα αποτελέσουν το υπεραγωγίμο οξειδίο. Η παραμένουσα στο ίζημα υγρασία αποβάλλεται με ξήρανση.

Η μέθοδος της συγκαταβύθισης είναι πιο αξιόπιστη από την πυροσυσσωμάτωση διότι η Παρασκευή της υπεραγωγίμης φάσης γίνεται με ανάμειξη ατόμων, δεν εισάγονται ακαθαρσίες και δεν «μολύνονται» τα όρια των κόκκων του υπεραγωγίμου υλικού, με σχηματισμό υμενίων άνθρακα.

**3. Τεχνική Sol-Gel ( Sol-Gel technique)**

Πρόκειται για πρωτοποριακή τεχνική παρασκευής πολύ καθαρών ,ομογενών και

λεπτόκοκκων κεραμικών υλικών. Μικροσκοπικά σωματίδια(1-100nm) σε κολλοειδή διασπορά(gel) ,συμπυκνώνονται και μετατρέπονται σε ελαστική μάζα(sol). Όταν η μετατροπή αυτή γίνεται με χημικό τρόπο, η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως sol-gel διεργασία και απαιτεί σταθερή τιμή του pH των χρησιμοποιούμενων διαλυμάτων. Η καθαρότητα και η στοιχειομετρία του κεραμικού υλικού μετά την ξήρανση των gels είναι πολύ υψηλή. Η τεχνική sol-gel λόγω της διασφάλισης της απαιτούμενης στοιχειομετρίας, είναι πολύ αποδοτική κυρίως σε πολυφασικά συστήματα όπως το BSCCO .

## **B. Παραγωγή και μορφοποίησή της προκειμένου να ληφθεί το προϊόν στην τελική του μορφή**

Στα υπεραγωγία κεραμικά είναι ψαθυρά υλικά, για αυτό απαιτούν ειδικές τεχνικές μορφοποίησης. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι:

### **B.1 Σεχνική παραγωγής συμπαγούς υπεραγωγίου υλικού.**

#### **B.1.1 Σεχνική τήξης-ανακρυστάλλωσης(melt texturing).**

Πρόκειται για τεχνική παρασκευής υπεραγωγίων μονοκρυστάλλων: Σκόνη υπεραγωγίου υλικού θερμαίνεται πολύ αργά στο διάστημα 1030-1180o C με αποτέλεσμα τη δημιουργία υγρής και στερεής φάσης. Με περαιτέρω θέρμανση στους 1320o C επιτυγχάνεται πλήρης τήξη. Στο τήγμα διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία για 2 περίπου ώρες και στη συνέχεια ψύχεται πολύ αργά. Κατά την ψύξη αναπτύσσονται βελανοειδείς κρυσταλλίτες μεγάλου μήκους(40-600μm).Η πυκνότητα ρεύματος είναι της τάξης των 104A/cm<sup>2</sup> σε θερμοκρασία υγρού αζώτου, τιμή πολύ υψηλότερη από αυτή των αντίστοιχων πολυκρυσταλλικών υπεραγωγίων υλικών. Εφαρμόζεται κυρίως στο υλικό YBCO στο οποίο η μορφοποίηση κατά την τεχνική «σκόνη μέσα σε σωλήνα» εμφανίζει προβλήματα.

#### **B.1.2 Σεχνική «σκόνη μέσα σε σωλήνα»(Powder in tube-PIT).**

Κατά την τεχνική αυτή σωλήνας από αγωγίμο μεταλλικό υλικό (Ag,St,Cu) πληρούται με σκόνη υπεραγωγίου υλικού .Ακολουθεί μείωση διατομής με μηχανικές κατεργασίες έλασης ή διέλασης.

Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σε βιομηχανική κλίμακα υπεραγωγίου σύρματος.

#### **B.1.3 Εκρηκτική συμπίεση σκόνης (Explosive compaction of powders).**

Η εκρηκτική συμπίεση σκόνης είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την

παραγωγή συμπαγούς υλικού από σκόνη. Η γρήγορη στερεοποίηση της σκόνης είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο τεχνολογικό πεδίο με το οποίο διαμορφώνονται μοναδικές μικροδομές υπεραγωγών. Φρησιμοποιείται κυρίως σε σκόνες που δεν μπορούν να διαμορφωθούν με τους συμβατικούς τρόπους κυρίως λόγω της υψηλής σκληρότητάς τους.

Κατά την εκρηκτική συμπίεση σκόνης, η σκόνη τοποθετείται σε ένα μεταλλικό περίβλημα (Ag, Cu κ.ά.) και γύρω από αυτό τοποθετείται ισχυρή εκρηκτική ύλη. Γίνεται ηλεκτρική διέγερση του υλικού και παράγεται κρουστικό κύμα (με εύρος έως και 900 GPa) το οποίο διαρκεί μερικά μικροδευτερόλεπτα (το ακριβές εύρος σε ένταση και χρόνο του κύματος εξαρτάται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης). Στο κρουστικό κύμα έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση και τη συσσωμάτωση της σκόνης, δημιουργώντας έτσι ένα συμπαγές υλικό.

Μετά από κατάλληλη θερμική κατεργασία ακολουθεί μορφοποίηση του σύνθετου υλικού (μεταλλικό περίβλημα-κεραμικός πυρήνας) με κατάλληλη μηχανική κατεργασία (ψυχή ή θερμή).

## **B.2 Σεχνική παρασκευής λεπτών υμενίων και επιστρωμάτων μεγάλου πάχους.**

### B.2.1 Υπεραγωγήμα επιστρώματα με ηλεκτροφόρηση.

Με αυτή τη μέθοδο, μετά από διάλυση της σκόνης σε κατάλληλους διαλύτες, επιλέγοντας την κατάλληλη πυκνότητα ρεύματος γίνεται συναπόθεση των μετάλλων που αποτελούν τη σκόνη στην κάθοδο. Κατόπιν, ακολουθεί θερμική κατεργασία σε ατμόσφαιρα οξυγόνου, προκειμένου να ελαττωθεί το πορώδες και να αναπληρωθεί το στοιχειομετρικό οξυγόνο. Στο πάχος των επιστρωμάτων αυτών είναι  $\sim d > 10 \mu\text{m}$ .

### B.2.2 Απόθεση ιόντων της καθόδου με χρήση ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος (RF/DC sputtering).

Με αυτή τη μέθοδο, η σκόνη προσάρεται και τοποθετείται πάνω σε μεταλλικό υποδοχέα, με την εφαρμογή κενού. Με την επιβολή ορισμένης τάσης, γίνεται εξάχνωση της σκόνης (κάθοδος) με κατάλληλη ηλεκτρική εκκένωση, και απόθεση της πάνω σε ειδικά υποστρώματα (MgO, SrTiO<sub>3</sub>). Στο πάχος των επιστρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 1-1000 nm. Ακολουθεί θερμική κατεργασία σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

### B.2.3 Εξάχνωση με δέσμη Laser (Laser ablation).

Η σκόνη προσάρεται σε μορφή παστίλιας και τοποθετείται απέναντι από την έξοδο της δέσμης laser. Η φωτοχημική αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την επιφάνεια του στόχου έχει σαν αποτέλεσμα τη φωτοχημική εξάχνωση (photochemical ablation) των ατόμων του κεραμικού υλικού και τη δημιουργία ενός φωτεινού κώνου, υψηλής θερμοκρασίας, που περιέχει άτομα διεγερμένα σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση (plume). Η εναπόθεση του υλικού στο υπόστρωμα, σε υψηλή σχετικά θερμοκρασία, ενεργοποιεί μηχανισμούς διάχυσης ατόμων του υποστρώματος στην περιοχή του υμενίου. Για λεπτά

υμένια, πάχους 10-1000nm ,τέτοιου είδους μόλυνση θεωρείται καταστροφική για τις υπεραγωγίμες ιδιότητες του υλικού(J,T).Για αυτό η επιλογή του υποστρώματος, πολλές φορές βασίζεται στην κρυσταλλογραφική συγγένεια του με το επίστρωμα και στην χημική του αδράνεια.(πχ LaAlO<sub>3</sub>). Έυχνά, για την παρεμπόδιση της μόλυνσης, προαποτίθεται στο υπόστρωμα ένα film φράγματος διάχυσης(πχ Ta).

Με αυτή τη μέθοδο διασφαλίζεται με τον πιο αξιόπιστο τρόπο η στοιχειομετρικής αναλογίας και προσανατολισμένης κρυσταλλογραφικής δομής απόθεση υλικού στο υπόστρωμα. Ακολουθεί θερμική κατεργασία σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

#### B.2.4 Συνεξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων(Electron beam coevaporation).

Οι πρώτες ύλες συνεξαχνώνονται κατόπιν βομβαρδισμού τους με δέσμες ηλεκτρονίων. Η στοιχειομετρική τους ανάμιξη οδηγεί στη δημιουργία λεπτού υμενίου(πάχους 1-1000nm) υπεραγωγίμου υλικού πάνω σε υπόστρωμα, συνήθως SrTiO<sub>3</sub>. Στη συνέχεια ή και ταυτόχρονα, πραγματοποιείται ανόπτηση σε ατμόσφαιρα οξυγόνου. Οι πυκνότητες ρεύματος σε τέτοια υποστρώματα μπορεί να φτάσουν τα 105 A/cm<sup>2</sup>, σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου.

#### B.2.5 Απόθεση με ψεκασμό πλάσματος.

Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να κατασκευασθούν υπεραγωγίμα επιστρώματα πάχους από 10μm έως μερικά mm,πάνω σε κεραμικό υλικό. Στη συνέχεια ακολουθεί θερμική κατεργασία σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση της τεχνικής PIT κατά την οποία σκόνη MgB<sub>2</sub> διελλάζεται . Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διέλασης ως κατεργασία, των θεωρητικών μοντέλων που την περιγράφουν και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προβλέπουν τα πρότυπα αυτά με τα πειραματικά δεδομένα από την διέλαση του MgB<sub>2</sub>.

Τα υπεραγωγίμα κεραμικά είναι ψαθυρά υλικά, για αυτό απαιτούν ειδικές τεχνικές μορφοποίησης. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι:

#### 1).Τεχνική τήξης-ανακρυστάλλωσης(melt texturing).

Πρόκειται για τεχνική παρασκευής υπεραγωγίμων μονοκρυστάλλων: Σκόνη υπεραγωγίμου υλικού θερμαίνεται πολύ αργά στους 1030-1180° C με αποτέλεσμα τη δημιουργία υγρής και στερεής φάσης. Με περαιτέρω θέρμανση στους 1320° C επιτυγχάνεται πλήρης τήξη. Το τήγμα διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία για 2 περίπου ώρες και στη συνέχεια ψύχεται πολύ αργά. Κατά την ψύξη αναπτύσσονται βελανοειδείς κρυσταλλίτες

μεγάλου μήκους(40-600μm). Η πυκνότητα ρεύματος είναι της τάξης των  $10^4 \text{ A/cm}^2$  σε θερμοκρασία υγρού αζώτου, τιμή πολύ υψηλότερη από αυτή των αντίστοιχων πολυκρυσταλλικών υπεραγωγίων υλικών. Εφαρμόζεται κυρίως στο υλικό YBCO στο οποίο η μορφοποίηση κατά την τεχνική «σκόνη μέσα σε σωλήνα» εμφανίζει προβλήματα.

## 2). Τεχνική «σκόνη μέσα σε σωλήνα»(Powder in tube-PIT).

Κατά την τεχνική αυτή σωλήνας από αγωγίμο μεταλλικό υλικό (Ag, St, Cu) πληρούται με σκόνη υπεραγωγίμου υλικού. Ακολουθεί μείωση διατομής με μηχανικές κατεργασίες έλασης ή διέλασης. Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σε βιομηχανική κλίμακα υπεραγωγίμου σύρματος. Η μήτρα του Cu προτιμάται όπως είδαμε και στην ανάλυση της μεθόδου PIT λόγω της ολκιμότητας του χαλκού, εν αντιθέσει με τον ψαθυρό υπεραγωγό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η μεταλλουργική κατεργασία των υπεραγωγίων υλικών, η οποία είναι απαραίτητη στην τεχνική PIT, βελτιώνει σε ορισμένες περιπτώσεις την υπεραγωγιμότητα τύπου II. Αυτό γίνεται είτε λόγω προσμίξεων, είτε με αύξηση της πυκνότητας διαταραχών κατά την μορφοποίηση, καθώς οι ακαθαρσίες και οι ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος (διαταραχές, όρια κόκκων, κατακρημνίσματα, εγκλείσματα κλπ) ενδέχεται να βελτιώσουν την υπεραγωγιμότητα (βλ. βιβλ. [25, 27] ).

## *3) Εκρηκτική συμπίεση σκόνης (Explosive compaction of powders).*

Η εκρηκτική συμπίεση σκόνης είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή συμπαγούς υλικού από σκόνη. Η γρήγορη στερεοποίηση της σκόνης είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο τεχνολογικό πεδίο με το οποίο διαμορφώνονται μοναδικές μικροδομές υπεραγωγών. Χρησιμοποιείται κυρίως σε σκόνες που δεν μπορούν να διαμορφωθούν με τους συμβατικούς τρόπους κυρίως λόγω της υψηλής σκληρότητάς τους.

Κατά την εκρηκτική συμπίεση σκόνης, η σκόνη τοποθετείται σε ένα μεταλλικό περίβλημα(Ag, Cu κ.ά.) και γύρω από αυτό τοποθετείται ισχυρή εκρηκτική ύλη. Γίνεται ηλεκτρική διέγερση του υλικού και παράγεται κρουστικό κύμα (με εύρος έως και 900GPa) το οποίο διαρκεί μερικά μικροδευτερόλεπτα (το ακριβές εύρος σε ένταση και χρόνο του κύματος εξαρτάται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης). Το κρουστικό κύμα έχει ως αποτέλεσμα τη συμπίεση και τη συσσωμάτωση της σκόνης, δημιουργώντας έτσι ένα συμπαγές υλικό.

Μετά από κατάλληλη θερμική κατεργασία ακολουθεί μορφοποίηση του σύνθετου υλικού (μεταλλικό περίβλημα-κεραμικός πυρήνας) με κατάλληλη μηχανική κατεργασία (ψυχρή ή θερμή).

Οι εφαρμογές των υπεραγωγών σχετίζονται άμεσα με τα μεγάλης έντασης ρεύματα που διαρρέουν ένα υπεραγωγίμο υλικό και τα ανάλογα επαγόμενα μαγνητικά πεδία.

- Υπεραγωγίμα σύρματα (μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος με ελάχιστες απώλειες και υψηλότερη πυκνότητα)
- Ισχυρότατοι ηλεκτρομαγνήτες για
  - Ιατρική τεχνολογία (μαγνητικοί τομογράφοι)
  - Πυρηνική τεχνολογία (επιταχυντές)
  - Μεταφορές (αιωρούμενο τρένο)
  - Μηχανολογία (υπεραγωγίμοι τριβείς)
  - Πολεμική βιομηχανία (μαγνητικά υπερφίλτρα, όπλα μαγνητικής επιτάχυνσης, E-Bomb)
- Εξαρτήματα μικροηλεκτρονικής (υπεραγωγίμοι διακόπτες H/Y, μαγνητόμετρα SQUID)

Βέβαια όλες αυτές οι εφαρμογές απαιτούν την αντίστοιχη εξέλιξη της Κρυογενικής τεχνολογίας (Cryogenics), αφού η υπεραγωγιμότητα επιτυγχάνεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, αποτελώντας την κυριότερη τροχοπέδη για την περαιτέρω εφαρμογή των υπεραγωγών.

### 3.3.3.2. Διβορίδιο Μαγνησίου

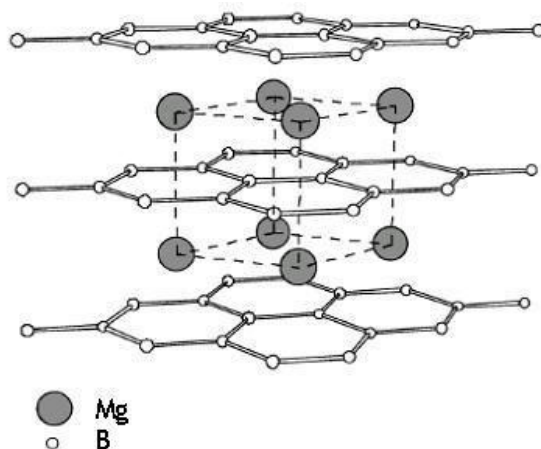
Το διβορίδιο του μαγνησίου ( $MgB_2$ ), γνωστό από την δεκαετία του 1950, βρέθηκε το 2001 ότι παρουσιάζει υπεραγωγίμες ιδιότητες με κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c=39K$ . Η ανακάλυψη αυτή προκάλεσε το παγκόσμιο ενδιαφέρον αφού το  $MgB_2$  ήταν ο πρώτος συμβατικός υπεραγωγός με τόσο υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία, δηλαδή δεν ήταν οξειδίο. Η κρίσιμη θερμοκρασία μετάπτωσης του υλικού σε υπεραγωγίμη κατάσταση ήταν ασυνήθιστα υψηλή για την απλή δομή που έχει, αφού ήταν σχεδόν διπλάσια από αυτές άλλων απλών ενδομεταλλικών ενώσεων.

Παράλληλα το υλικό αυτό φτιάχνεται από πολύ ελαφριά και φθηνά στοιχεία και το σχηματιζόμενο  $MgB_2$  του μαγνησίου έχει πολύ καλές μεταλλικές ιδιότητες, δηλαδή δεν παρουσιάζει υψηλή αντίσταση επαφής με μεταλλικά στοιχεία, εξουδετερώνοντας έτσι το πρόβλημα των ασθενών επαφών που έχουν πολλές ενώσεις. Παράλληλα, η μεγάλη αγωγιμηλεκτρονική πυκνότητα και η αγωγιμότητά του στην κανονική κατάσταση είναι μία με δύο τάξεις μαγνητισμού υψηλότερες για το  $MgB_2$  απ' ότι των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα καλώδια.

Αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό με το μικρό κόστος, το μικρό βάρος, την σχετική ευκολία στην σύνθεσή του και στην δυνατότητα μορφοποίησης σε καλώδια και λεπτά υμένα, κάνουν το  $MgB_2$  ελκυστικό για πολλές εφαρμογές αφήνοντας πολλές υποσχέσεις για ποικίλες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας καθώς και ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί μελέτες για υπεραγωγούς με κρίσιμες θερμοκρασίες έως και 138K (υπεραγωγίμα υλικά με βάση τον Hg), το  $MgB_2$  του

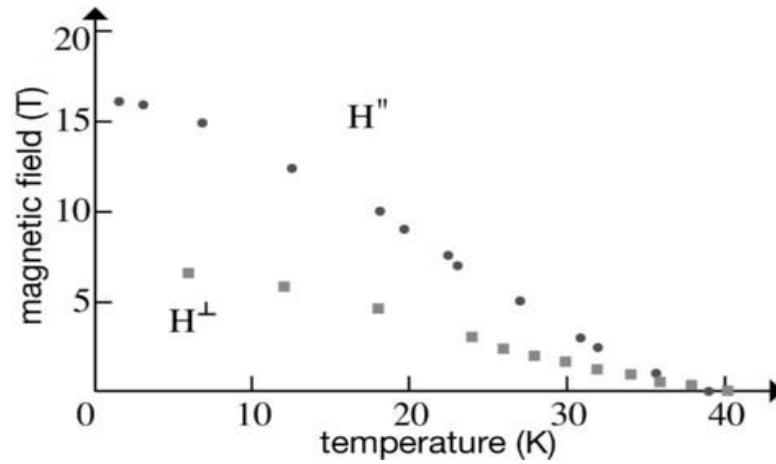
μαγνησίου προσέλκυσε πολλαπλάσιο ερευνητικό ενδιαφέρον και αυτό χάρη στην απλή δομή του, την εύκολη παρασκευή του και την αφθονία των συστατικών του. Όσον αφορά την κρυσταλλική δομή του  $MgB_2$  αυτή αποτελείται από κυψελωτά εξάγωνα που σχηματίζουν τα άτομα του βορίου (κάθε άτομο B βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο και ισαπέχει από τρία άλλα άτομα B) ενώ στον νοητό άξονα που περνά από το κέντρο του κάθε εξαγώνου εντοπίζονται τα άτομα μαγνησίου σε ανώτερο ή κατώτερο ωστόσο επίπεδο από το εξάγωνο των ατόμων βορίου. Η κρυσταλλική δομή του  $MgB_2$  δεν διαφέρει από την δομή των περισσότερων βοριδίων, ακολουθώντας έτσι την επονομαζόμενη εξαγωνική δομή τύπου  $AlB_2$ , με διαστάσεις των σχηματιζόμενων εξαγωνικών κυψελίδων  $a=b=3.086\text{\AA}$  και  $c=3.524\text{\AA}$  (σχ. 3.12).



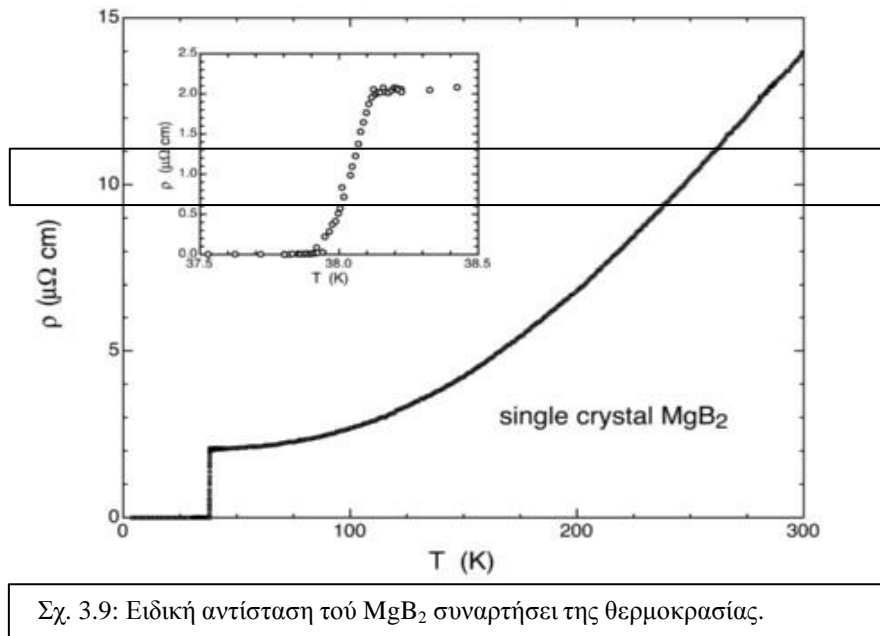
Σχ. 3.8: Σχηματική αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής του  $MgB_2$ .

Το διβορίδιο του μαγνησίου είναι υπεραγωγός τύπου II με κρίσιμη θερμοκρασία ίση με  $T_c=39\text{K}$ , μοριακό βάρος  $MB=45,93\text{g/mol}$ , θεωρητική πυκνότητα συμπαγούς υλικού  $2,57\text{g/cm}^3$  και θερμοκρασία τήξης  $T_m=800-830^\circ\text{C}$ . Το χαμηλό κρίσιμο μαγνητικό πεδίο του  $a$  είναι στη θερμοκρασία των  $0\text{K}$ ,  $H_{c1}(0)\sim 0.35\text{T}$ , ενώ το άνω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο στους  $0\text{K}$  κυμαίνεται κοντά στους  $H_{c2}(0)\sim 38\text{T}$ . Οι μεταβολές αυτές φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα (σχ. 3.13 & 3.14). Αν δε το υλικό έχει ακαθαρσίες, τότε το άνω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο μπορεί μέχρι και να τριπλασιαστεί, με ταυτόχρονη όμως μείωση της  $T_c$ .





Σχ. 3.13: Μαγνητικό πεδίο του  $\text{MgB}_2$  συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχ. 3.9: Ειδική αντίσταση του  $\text{MgB}_2$  συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι ιδιότητες του  $\text{MgB}_2$ , ειδικά οι μηχανικές, ποικίλουν αρκετά ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής της σκόνης. Συγκεντρωτικά, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του  $\text{MgB}_2$  φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

### Διβορίδιο του Μαγνησίου

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού           | 2,57 g/cm <sup>3</sup> |
| Μοριακό Βάρος                        | 45,93 g/mol            |
| Θερμοκρασία Τήξης                    | ~830 °C                |
| Κρίσιμη Θερμοκρασία Υπεραγωγιμότητας | μέχρι 39K              |
| Μέτρο Ελαστικότητας                  | ~270 GPa               |
| Μέτρο Διάτμησης                      | ~120 GPa               |
| Όριο Συμπιεστότητας                  | ~150 GPa               |
| Όριο Θραύσης σε Εφελκυσμό            | ~200 MPa               |
| Όριο Θραύσης σε Θλίψη                | ~1100 MPa              |

Η υπεραγωγιμότητα του MgB<sub>2</sub> οφείλεται πρώτιστα στα διδιάστατα μεταλλικά επίπεδα του Βορίου ενώ η υψηλή T<sub>c</sub> σχετίζεται με τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων-φωτονίων, τις υψηλές δονητικές ενέργειες των ελαφρών ατόμων του βορίου και την ύπαρξη και δεύτερου ενεργειακού χάσματος.

Το MgB<sub>2</sub> διαμορφώνεται βάσει των μεθόδων που αναλύθηκαν παραπάνω και ισχύουν για τους περισσότερους υπεραγωγούς, με την μέθοδο PIT να αποτελεί την πλέον εμπορική μέθοδο. Για όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω (κόστος, κατεργασιμότητα, απλή σύνθεση κ.ά.), επιλέχθηκε ως το αντιπροσωπευτικό δείγμα υπεραγωγού της παρούσας μελέτης.

Οι μελέτες, με βάση την βιβλιογραφία, που έχουν γίνει για την διαμόρφωση του MgB<sub>2</sub> αφορούν ως επί το πλείστον την παραγωγή και χαρακτηρισμό καλωδίων που στο περίβλημα (μήτρα) έχουν ένα μέταλλο (Cu, Fe, Ag ή Al) και στο εσωτερικό συμπιέζεται κατά την διαμόρφωση (έλαση ή διέλαση) σκόνη MgB<sub>2</sub>. Οι περισσότερες χρησιμοποιούν έτοιμη σκόνη MgB<sub>2</sub>, ενώ η παραγωγή από Mg και B προϋποθέτει μόνο ανάμειξη και κατάλληλη πυροσυσσωμάτωση (ενδέχεται να γίνει και κατά την κατεργασία, βιβλ. [26]). Μετά την κατεργασία επίσης συνήθως δεν απαιτείται περαιτέρω πυροσυσσωμάτωση.

Ένα ενδιαφέρον εύρημα επίσης που αφορά το MgB<sub>2</sub>, είναι η αντίδραση που έχουμε τονερόκαι τον αέρα. Η απευθείας επαφή του με το νερό οδηγεί σε άμεση αλλαγή της δομής του σε λιγότερο κρυσταλλική, με αποτέλεσμα να χάνει την υπεραγωγιμότητα του, ενώ τα παράγωγα της αντίδρασης με το νερό και τον αέρα είναι Mg(OH)<sub>2</sub>, MgCO<sub>3</sub> και B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Η αντίδραση αυτή ακόμα, όταν έχει συμπιεστεί η σκόνη του υπεραγωγού, είναι εξώθερμη και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε έκρηξη. Μακροπρόθεσμα, το MgB<sub>2</sub> αντιδρά ακόμα και με τον αέρα, γι' αυτό στις εφαρμογές του απαιτείται καλή μόνωση (για πρισότερη ανάλυση, βλ. βιβλ. [28]).

## 4. Πειραματική διαδικασία [3, 5, 8, 9, 37, 41]

### 4.1. Σκοπός

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι:

1. Να παράγουμε λειτουργικά τελικά τεμάχια σε άρτια μορφή και χωρίς σημαντικές φθορές
2. Να χρησιμοποιήσουμε όσο γίνεται ποιο οικονομική και γρήγορη διεργασία για την παραγωγή των τελικών τεμαχίων. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ βασικός και καθοριστικός σχετικά με τις αποφάσεις παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες.
3. Η σκόνη να συμπιεστεί επαρκώς εως μια μορφή η οποία να είναι αποδεκτή
4. Να καθορίσουμε το στάδιο της κατεργασίας στο οποίο θα πετύχουμε την αρτιότερη συμπίεση
5. Βελτιστοποίηση τελικού τεμαχίου με τον καθορισμό της διαμέτρου της οπής στην μπιγιέτα για την πλήρωσή της με την σκόνη του διβορίδιου του Μαγνησίου
6. Να εξαλείψουμε όσο το δυνατόν γίνεται τους παράγοντες της τυχαιότητας των τελικών δοκιμίων.

Να αξιολογήσουμε τα τελικά προϊόντα με την μέθοδο της οπτικής παρατήρησης καθώς και με τον έλεγχο σκληρότητας της τελικής μορφής της σκόνης.

### 4.2. Διατάξεις

Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία αφορούν την κατεργασία και στη συνέχεια τον χαρακτηρισμό των δοκιμίων μας.

Η κατεργασία, δηλαδή η έλαση κυλινδρικής μορφής, έγινε στο εργαστήριο τού τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της σχολής μηχανολόγων μηχανικών και πραγματοποιήθηκε σε έλαστρο μορφής, 2 ραούλων (διάμετρος τυμπάνου  $D=240\text{mm}$  και πλάτους  $b=190\text{mm}$ , με κυλινδρικής μορφής αυλακώσεις, οι οποίες έχουν διαμέτρους:  $d_1=15.5\text{mm}$ ,  $d_2=13\text{mm}$ ,  $d_3=10.5\text{mm}$ ,  $d_4=8.5\text{mm}$ ,  $d_5=6.5$ ,  $d_6=5\text{mm}$ . Μεταξύ των 2 ραούλων αφέθηκε διάκενο 1,5 χιλιοστά, επομένως οι αυλακώσεις περιμένουμε να έχουν διαμέτρους  $d_1=17\text{mm}$ ,  $d_2=14,5\text{mm}$ ,  $d_3=12\text{mm}$ ,  $d_4=10\text{mm}$ ,  $d_5=8$ ,  $d_6=6,5\text{mm}$ . Η ταχύτητα των ραούλων είναι 4rpm. Τα σχήματα που ακολουθούν δείχνουν όλο το έλαστρο και επικεντρώνονται στα ράουλα, τα οποία παίρνουν κίνηση από ηλεκτροκινητήρα μέγιστης ισχύος 44hp.



Σχ. 4.1: Φωτογραφία όλης της διάταξης τού ελάστρου.



Σχ. 4.2: Φωτογραφία (αριστερά) και σχεδίαση (δεξιά) της διάταξης των τυμπάνων με κυλινδρικές αυλακώσεις. Στο κέντρο φαίνεται το διάκενο μεταξύ των τυμπάνων

Η μετρητική διάταξη που περιλαμβάνει δυναμόμετρο (συνδεδεμένο πάνω και κάτω από το άνω και κάτω ράουλο αντίστοιχα) με ενισχυτή Kistler και ροπόμετρο (συνδεδεμένο στο κάτω άξονα τού ελάστρου) με ενισχυτή HBM για την μέτρηση του φορτίου ελάσεως και της ροπής στρέψεως των τυμπάνων αντίστοιχα. Αυτά βρίσκονται συνδεδεμένα με Η/Υ, ο οποίος με κατάλληλο λογισμικό κάνει την επεξεργασία των σημάτων και δίνει τις καμπύλες φορτίου και ροπής συναρτήσεως του χρόνου. Η όλη μετρητική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ. 4.3):



Σχ. 4.3: Φωτογραφία της μετρητικής διάταξης με τον ενισχυτή τού δυναμομέτρου (μπλε) και του ροπομέτρου (άσπρο) .

Αφού τα δοκίμια κατεργάστηκαν και είχαμε τις μετρήσεις δύναμης, ροπής και διαστάσεων, ακολούθησε χαρακτηρισμός τους. Αυτός έγινε με οπτικό μικροσκόπιο Leica (σχ. 4.4), καθώς και με την σκληρομέτρηση που έγινε σε κάθε δοκίμιο.



Σχ. 4.4: Φωτογραφία της διάταξης τού οπτικού μικροσκοπίου .

### 4.3. Προετοιμασία και σχεδιασμός πειραμάτων

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο PIT και στη συνέχεια μορφοποιήθηκαν με έλαση μορφής ήταν μιγέτες τετράγωνης γεωμετρίας με ύψος  $h=75\text{mm}$  και εξωτερικές διαστάσεις  $16*16\text{mm}$ . Χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα 6 μιγέτες με διαφορετικές οπές ανά ζευγάρι οι οποίες προέρχονταν από 2 ράβδους μήκους  $150\text{mm}$ .

Στην αρχή κατασκευάστηκαν μέσω χύτευσης 3 ράβδοι αλουμινίου με διαστάσεις  $16\text{mm}*16\text{mm}*150\text{mm}$ . Στην συνέχεια κόπηκαν στην μέση για να έχουμε 6 τελικά τεμάχια με διαστάσεις  $16\text{mm}*16\text{mm}*75\text{mm}$ . Στην συνέχεια ανοίξαμε μια οπή σε κάθε τεμάχιο

Κόπηκαν στην μέση και δημιουργήσαμε 3 ζευγάρια μιγετών τα οποία προέρχονταν από διαφορετική ράβδο. Το πείραμα έγινε για κάθε μιγέτα με σκοπό να επαληθευθεί η ομοιογένεια στην συμπεριφορά της διέλασης.

Τα χαρακτηριστικά της κάθε μπιγιάτας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| <b>Τεμάχιο</b> |          | <b>Εξωτ. Διαστάσεις</b> | <b>Διαστάσεις Οπών</b> |
|----------------|----------|-------------------------|------------------------|
| <b>5.1</b>     | <u>D</u> | 20                      | 5                      |
|                | <u>L</u> | 75                      | 52.28                  |
| <b>5.2</b>     | <u>D</u> | 20                      | 4.98                   |
|                | <u>L</u> | 75                      | 56.84                  |
| <b>6.1</b>     | <u>D</u> | 20                      | 6.82                   |
|                | <u>L</u> | 75                      | 62.24                  |
| <b>6.2</b>     | <u>D</u> | 20                      | 6.6                    |
|                | <u>L</u> | 75                      | 58.2                   |
| <b>8.1</b>     | <u>D</u> | 20                      | 8.4                    |
|                | <u>L</u> | 75                      | 62.16                  |
| <b>8.2</b>     | <u>D</u> | 20                      | 8.3                    |
|                | <u>L</u> | 75                      | 69.94                  |



Σχ. 4.4: Φωτογραφία των τεμαχίων. Ο πρώτος αριθμός αφορά την οπή διάνοιξης ενώ ο δεύτερος αριθμός αφορά τον αριθμό του τεμαχίου

Κατασκευάστηκαν σε τόρνο, στο μηχανουργείο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της σχολής μηχανολόγων μηχανικών του ΕΜΠ (σχ. 4.6).



Σχ. 4.5: Φωτογραφία κατά την κατασκευή των δοκιμίων σε τόρνο.

Μετά την διάνοιξη των οπών γεμίσαμε τις οπές με διβορίδιο του μαγνησίου και σφραγίσαμε τις οπές με μεταλλικά ελάσματα για να μην διαφύγει η σκόνη.



Σχ. 4.6: Φωτογραφία του διβοριδίου το μαγνησίου

Στην συνέχεια ξεκίνησε η κατεργασία διαμόρφωσης περνώντας το κάθε τεμάχιο από όλα τα πάσα ενώ καταγράφηκαν όλα τα γεωμετρικά τους στοιχεία μετά από κάθε πάσο.



Κατά την μορφοποίηση, είπαμε ότι τα δοκίμια πέρασαν από 6 πάσα, μέχρι εκεί που άντεχε το υλικό της μήτρας και δεν χυνόταν σκόνη από τα πλάγια. Η πειραματική διαδικασία κατά την μορφοποίηση είχε ως εξής:

1. Έλαση με μέτρηση δύναμης και ροπής..
2. Καθαρισμός των προεξοχών με πένσα (η προεξοχές προέρχονται από την αναγκαία ανοχή μεταξύ των ραούλων, σχ. 4.9).
3. Μέτρηση Διαμέτρου (D), μήκους (L) καθώς και φωτογράφιση, όλα μετά από κάθε πάσο.
4. Κόψιμο δείγματος αν ήταν μετά το 2<sup>ο</sup> πάσο και στο τέλος της κατεργασίας.

Τα 4 πρώτα δοκίμια με τις σπές των 5 και 6mm πέρασαν από όλα τα πάσα, ενώ τα δύο τελευταία δοκίμια με σπή των 8 mm δεν πέρασαν από το τελευταίο πάσο καθώς είδη από το 5<sup>ο</sup> πάσο ξεκίνησε η κροκοδειλίαση .



Σχ. 4.7: Φωτογραφία δοκίμιου μετά το πέρασμα ανάμεσα στα ράουλα, με τις προεξοχές που δημιουργούνται και πρέπει να αφαιρεθούν.

#### 4.4. Χαρακτηρισμός Δειγμάτων

Για μια πιο ενδελεχή μελέτη της όλης κατεργασίας, ήταν απαραίτητο να γίνει χαρακτηρισμός των δειγμάτων, ώστε να παρατηρηθεί η μικροδομή και γενικά κάποιες αλλαγές στη δομή τού τελικού προϊόντος, αναγκαστικά λοιπόν με καταστροφικές μεθόδους (αφού αφαιρέθηκε δείγμα).

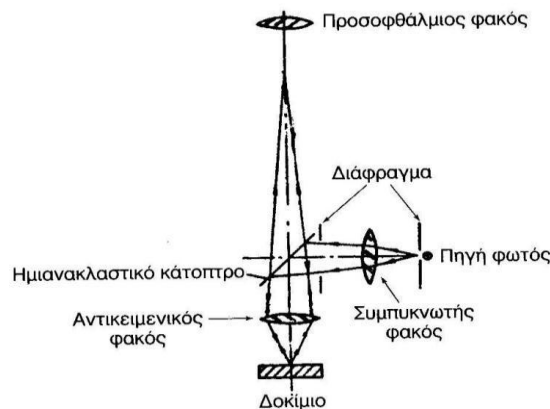
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

1. Οπτική Μικροσκοπία (OM): με κύριο γνώμονα την μελέτη της διεπιφάνειας μήτρας-σκόνης και μια γενική αρχική παρατήρηση.
2. Σκληρομέτρηση κατά Brinell - Vickers

Αξίζει τώρα να γίνει μια μικρή παρουσίαση της θεωρίας λειτουργίας καθενός από τα μέσα που χρησιμοποιήσαμε.

#### 4.4.1 Οπτικό μικροσκόπιο (ΟΜ)

Για τα οπτικά μικροσκόπια, η μέγιστη μεγεθυντική ικανότητα είναι περίπου X1000 (~200nm) και το βάθος πεδίου, δηλαδή η μέγιστη διαδρομή που μπορεί να κινηθεί το δοκίμιο κατά μήκος του άξονα του μικροσκοπίου χωρίς να αλλοιωθεί η ποιότητα της εικόνας του, της ίδιας τάξης μεγέθους αν και μικρότερο. Η πηγή είναι το λευκό φως και η διάταξη ενός οπτικού μικροσκοπίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ. 4.15).



Σχ. 4.8: Διάγραμμα λειτουργίας οπτικού μικροσκοπίου.

Για την παρατήρηση του υλικού μας σε μικροσκόπιο (είτε οπτικό είτε ηλεκτρονικό), εκτός από την κοπή του δοκιμίου, είναι απαραίτητη πάντα η λείανση (μηχανική ή ηλεκτροχημική) και συνήθως η χημική προσβολή, ώστε να διαβρωθούν «εκλεκτικά» τα όρια των κόκκων και τα διάφορα κρυσταλλικά επίπεδα των φάσεων. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε την δημιουργία αντίθεσης στην επιφάνεια και επιτυγχάνεται η απεικόνιση των μικροδομικών χαρακτηριστικών αν είναι επιθυμητή η ενδελεχής μελέτη του δείγματος.

#### 4.4.2 Σκληρομέτρηση υλικών

##### 4.4.2.1 Γενικά

Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη, τον έλεγχο και την ανάλυση των υλικών περιλαμβάνονται και μέθοδοι προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, όπου μεταξύ άλλων μελετώνται:

- Η **αντοχή σε εφελκυσμό**, που δείχνει τη μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα υλικό χωρίς να προκαλέσει τη θραύση του
- Η **σκληρότητα**, που αποτελεί μέτρο της ικανότητας πλαστικής παραμόρφωσης ενός υλικού
- Η **δυσθραυστότητα**, που δείχνει το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για τη θραύση ενός δοκιμίου με τη βοήθεια ενός κρουστικού φορτίου και αποτελεί μέτρο της αντίστασης ενός υλικού σε θραύση

- Η **αντοχή σε ερπυσμό**, που δείχνει τη συμπεριφορά ενός υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες υπό φόρτιση
- Η **αντοχή σε κόπωση**, που δείχνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να εφαρμόζεται σε ένα υλικό που υφίσταται επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις χωρίς να σπάσει.

Οι μηχανικές δοκιμές έχουν κανονικοποιηθεί από εθνικούς οργανισμούς όπως η ASTM (American Society for Testing and Materials) και ο ISO (International Standardization Organization) προκειμένου τα αποτελέσματά τους να είναι ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμών και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και τη βαθμονόμηση τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η **σκληρότητα** είναι ένα μέτρο της αντίστασης του υλικού στην προσπάθεια τοπικής πλαστικής παραμόρφωσης της επιφάνειάς του. Για τα μεταλλικά υλικά η σκληρότητα εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου, τη κρυσταλλική του δομή και τις τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας του. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ελέγχου της σκληρότητας των υλικών, όπως η σκληρότητα σε εγχάραξη και η σκληρότητα σε διείσδυση.

Οι μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας σε διείσδυση είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο και στηρίζονται στη μέτρηση της αντίστασης που προβάλλει το υλικό στη διείσδυση ενός σκληρού, μικρών διαστάσεων εξαρτήματος (διεισδυτή), το οποίο πιέζεται με κατάλληλη δύναμη κάθετα στην επιφάνεια του υλικού. Η σκληρότητα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείσδυση του διεισδυτή. Για τη μέτρηση της σκληρότητας σε διείσδυση χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι που διαφέρουν ως προς το υλικό και το σχήμα του διεισδυτή, τα επιβαλλόμενα φορτία και τα μετρούμενα μεγέθη. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι μέθοδοι **Brinell**, **Rockwell** και **Vickers** οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Οι τιμές της σκληρότητας χρησιμοποιούνται σαν κριτήριο για την σύγκριση υλικών μεταξύ τους, το σχεδιασμό και τον έλεγχο μηχανικών και θερμικών κατεργασιών τους καθώς και τον έλεγχο ποιότητας επιφανειακών κατεργασιών.

Η δοκιμασία της σκληρότητας είναι μια απλή, γρήγορη, σχετικά εύκολη και μικρού κόστους μέθοδος ελέγχου ποιότητας. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι από τις τιμές της σκληρότητας είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό ( $\sigma_T$ ) και η αντοχή σε φθορά, οι δοκιμές των οποίων είναι πιο δύσκολες και πολύπλοκες. Ομως η σχέση μεταξύ των μηχανικών αυτών ιδιοτήτων διαφέρει από υλικό σε υλικό. Πάντως για ορισμένα κράματα έχουν βρεθεί προσεγγιστικές σχέσεις οι οποίες επιτρέπουν την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής τους σε

εφελκυσμό από τις τιμές της σκληρότητας με ακρίβεια 5-10%. Για παράδειγμα για την περίπτωση του χαλκού, ορείχαλκου και μπρούτζου η σχέση μεταξύ της αντοχής σε εφελκυσμό και της σκληρότητας είναι:

$$\text{- για ανοπτημένα υλικά: } \sigma_T = 0,55 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$$

- για σκληρυμένα με παραμόρφωση:  $\sigma_T = 0,40 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$   
 ενώ για την περίπτωση του αλουμινίου και των κραμάτων του για σκληρότητες μεταξύ 20 και 25HB ισχύει ότι  $\sigma_T = 0,33 - 0,36 \text{ HB(kg/mm}^2\text{)}$ , ενώ για το ντουραλουμίνιο  $\sigma_T = 0,36 \text{ HB (kg/mm}^2\text{)}$ .

#### 4.4.2.2 Σκληρομέτρηση κατά Vickers

Στη μέθοδο αυτή ο διεισδυτής είναι από διαμάντι, σχήματος τετραγωνικής πυραμίδας, με γωνία κορυφής  $136^\circ$ . Η μέθοδος Vickers είναι παρεμφερής της μεθόδου Brinell αφού ο διεισδυτής πιέζεται με ορισμένη δύναμη πάνω στην επιφάνεια που σκληρομετρείται, κατόπιν το φορτίο απομακρύνεται και μετρώνται οι δύο διαγώνιες του τετραγωνικού αποτυπώματος ( $d_1$  και  $d_2$ , σχήμα 2). Το φορτίο κυμαίνεται από 1 μέχρι 120 kgP ενώ η ταχύτητα εφαρμογής του ρυθμίζεται και δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 0,3mm/s. Το φορτίο διατηρείται σταθερό επί 15 ή 30s. Τα τυποποιημένα σκληρόμετρα Vickers έχουν σύστημα αυτόματης επιβολής και απελευθέρωσης του φορτίου. Η σκληρότητα υπολογίζεται από το λόγο του εφαρμοζόμενου φορτίου προς την επιφάνεια του αποτυπώματος από τη σχέση:

$$HV \left( \frac{Kp}{\text{mm}^2} \right) = \frac{F}{S} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

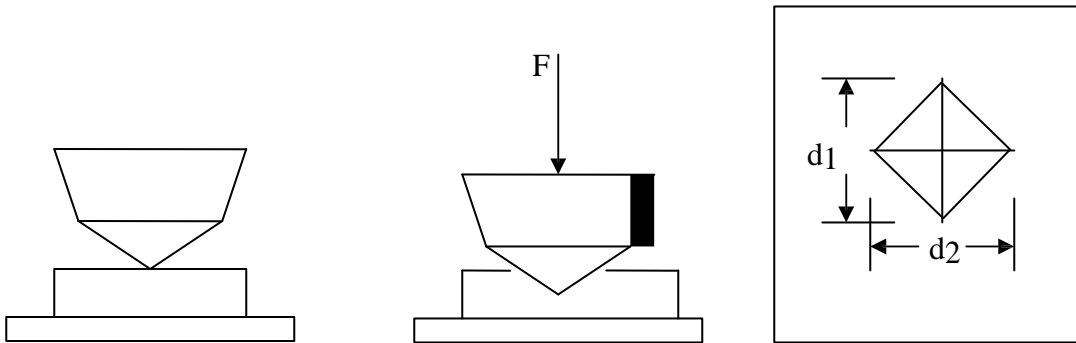
όπου

$$d = \frac{d_{11} + d_{12}}{2}$$

Επειδή το λαμβανόμενο αποτύπωμα είναι μικρό και απαιτείται η μέτρηση των διαστάσεών του, η επιφάνεια του δοκιμίου πριν από τη μέτρηση πρέπει να λειαίνεται πολύ καλά.

Η μέθοδος Vickers χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις πολύ σκληρών και λεπτών δοκιμίων καθώς και δοκιμίων τα οποία έχουν υποστεί επιφανειακές κατεργασίες σκλήρυνσης. Επίσης είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της σκληρότητας διαφορετικών μικροσυστατικών ενός υλικού. Τέτοιες μετρήσεις είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό της διαφοροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ διαφόρων περιοχών του εξεταζόμενου υλικού. Στις περιπτώσεις αυτές επειδή οι μετρήσεις γίνονται σε πολύ μικρές επιφάνειες (πχ. στο εσωτερικό μιας φάσης ή στο στρώμα μιας επιμετάλλωσης) χρησιμοποιούνται μικροσκληρόμετρα Vickers τα οποία χρησιμοποιούν φορτία από μερικά έως μερικές δεκάδες γραμμάρια.

Η σκληρότητα κατά Vickers δίνεται υπό την μορφή **X HV/F/t**. Αν ο χρόνος είναι 15 s δεν αναγράφεται. Για παράδειγμα σκληρότητα 700HV/10 δηλώνει σκληρότητα 700 Vickers με χρήση φορτίου 10 kgf για χρόνο 15 s.



Σχ. 4.9: Σκληρομέτρηση Vickers. Προσδιορισμός διαγωνίων αποτυπώματος.

Η μέθοδος πλεονεκτεί της μεθόδου Brinell στο ότι τα όρια του αποτυπώματος είναι πιο καθαρά και σαφή και στο γεγονός ότι το διαμάντι είναι πολύ σκληρό υλικό με αποτέλεσμα να μην παραμορφώνεται εύκολα. Οι τιμές της σκληρότητας Vickers συμπίπτουν με τις αντίστοιχες της Brinell μέχρι την τιμή των 400HV. Πάνω από τη τιμή αυτή η σκληρότητα Vickers είναι πάντα μεγαλύτερη και πιο ακριβής.

Για την ακριβή σκληρομέτρηση θα πρέπει να εφαρμόζονται τα παρακάτω:

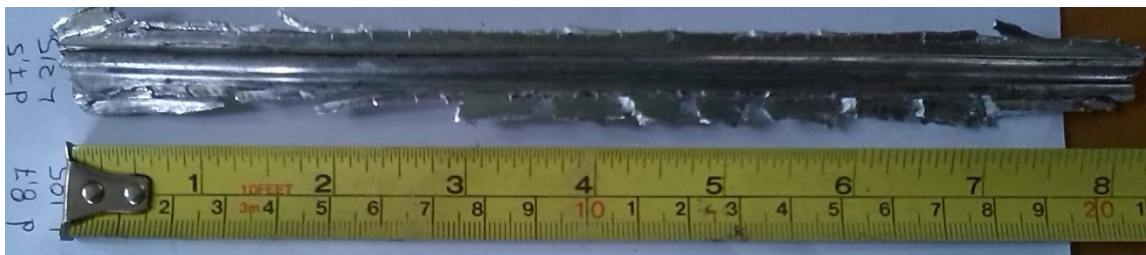
- Το πάχος  $S$  του δοκιμίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μιάμιση φορά μεγαλύτερο της μέσης τιμής των διαγωνίων του αποτυπώματος, δηλ.  $S > 1,5 \delta$ , για να μην επηρεάζεται η μέτρηση από την αντίσταση του υποστηρίγματος του δοκιμίου.
- Ανάλογα με την σκληρότητα του υλικού και το πάχος του δοκιμίου χρησιμοποιούνται διάφορα φορτία  $F$ :
  1. για μαλακά υλικά ή για μικρά βάθη διείσδυσης, όταν για παράδειγμα σκληρομετρείται ένα πολύ λεπτό υλικό, συνιστάται η χρησιμοποίηση δυνάμεων 0,2-0,3-0,5-1-2-3-5 Kgf. Η μετρούμενη σκληρότητα εξαρτάται από την τιμή της  $F$  που χρησιμοποιείται.
  2. -για σκληρά υλικά και για συνηθισμένα δοκίμια χρησιμοποιούνται φορτία 10-20-30-50-100 kgf. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της σκληρότητας είναι πρακτικά ανεξάρτητη της  $F$ .
- Τα σημεία δοκιμής πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 3 διαγώνιους μεταξύ τους.

## 5. Αποτελέσματα

### 5.1. Πειραματικά

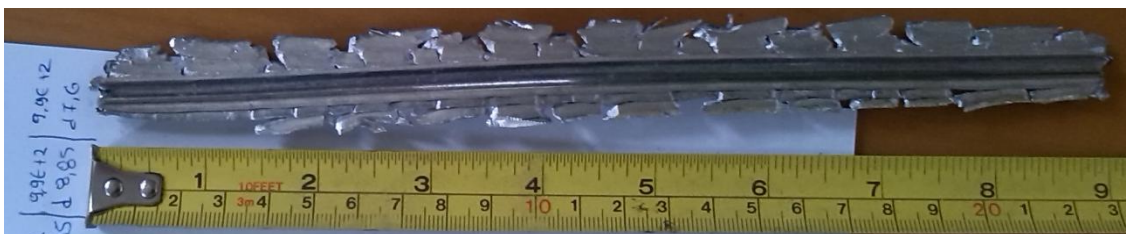
Αρχικά παρατίθενται οι φωτογραφίες και πίνακες που αφορούν την τελική γεωμετρία του δοκιμίου και την συμπίεση της σκόνης. Οι φωτογραφίες που ακολουθούν είναι ενδεικτικές κυρίως της τελικής μορφής που είχαν τα δοκίμια μας μετά την κατεργασία.

**1<sup>ο</sup> – δοκίμιο 5.1, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 5mm και βάθος 52,28 mm – τελικής διάστασης 7,5mm και μήκος 215mm**



Σχ. 5.1: Το 1ο δοκίμιο 5.1 μετά το 6ο πάσο.

**2<sup>ο</sup> – δοκίμιο 5.2, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 4,98mm και βάθος 56,84mm – τελικής διάστασης 7,6mm και μήκος 225mm**



Σχ. 5.2: Το 2ο δοκίμιο 5.2 μετά το 6ο πάσο.

**3<sup>ο</sup> – δοκίμιο 6.1, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 6,82mm και βάθος 62,24mm – τελικής διάστασης 7,5mm και μήκος 240mm**



Σχ. 5.3: Το 3ο δοκίμιο 6.1 μετά το 6ο πάσο.

**4<sup>ο</sup> – δοκίμιο 6.2, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 6,6mm και βάθος 58,2mm – τελικής διάστασης 7,4mm και μήκος 230mm**



Σχ. 5.4: Το 4ο δοκίμιο 6.2 μετά το 6ο πάσο.

**5<sup>ο</sup> – δοκίμιο 8.1, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 8,4mm και βάθος 62,16mm – τελικής διάστασης 9mm και μήκος 190mm**



Σχ. 5.5: Το 5ο δοκίμιο 8.1 μετά το 6ο πάσο.

**6<sup>ο</sup> – δοκίμιο 8.2, Μπιγιέτα αλουμινίου αρχικής διάστασης 20\*20\*75 (mm) με οπή 8,3mm και βάθος 69,94mm – τελικής διάστασης 8,8mm και μήκος 193mm**



Σχ. 5.6: Το 5ο δοκίμιο 8.1 μετά το 6ο πάσο.

Σε όλα τα δοκίμια η διαδικασία εξελίχθηκε ομαλά ενώ όλα τα δοκίμια πέρασαν και από τα 6 πάσα εκτός από τα δοκίμια 8.1 – 8.2 τα οποία δεν πέρασαν από το 6<sup>ο</sup> πάσο. Τα δοκίμια μετά από κάθε πάσο είχαν επιθυμητή μορφή. Μετά το 5<sup>ο</sup> πάσο κρίθηκε ότι τα δοκίμια 8.1 και 8.2 δεν πρέπει να περάσουν από το 6<sup>ο</sup> πάσο καθώς η μπιγιέτα είχε ξεκινήσει να ανοίξει στα άκρα της. Ήταν φανερό ότι εάν πέρναγαν τα δοκίμια και από το 6<sup>ο</sup> πάσο θα παρουσιαζόταν το φαινόμενο της κροκοδειλίας.

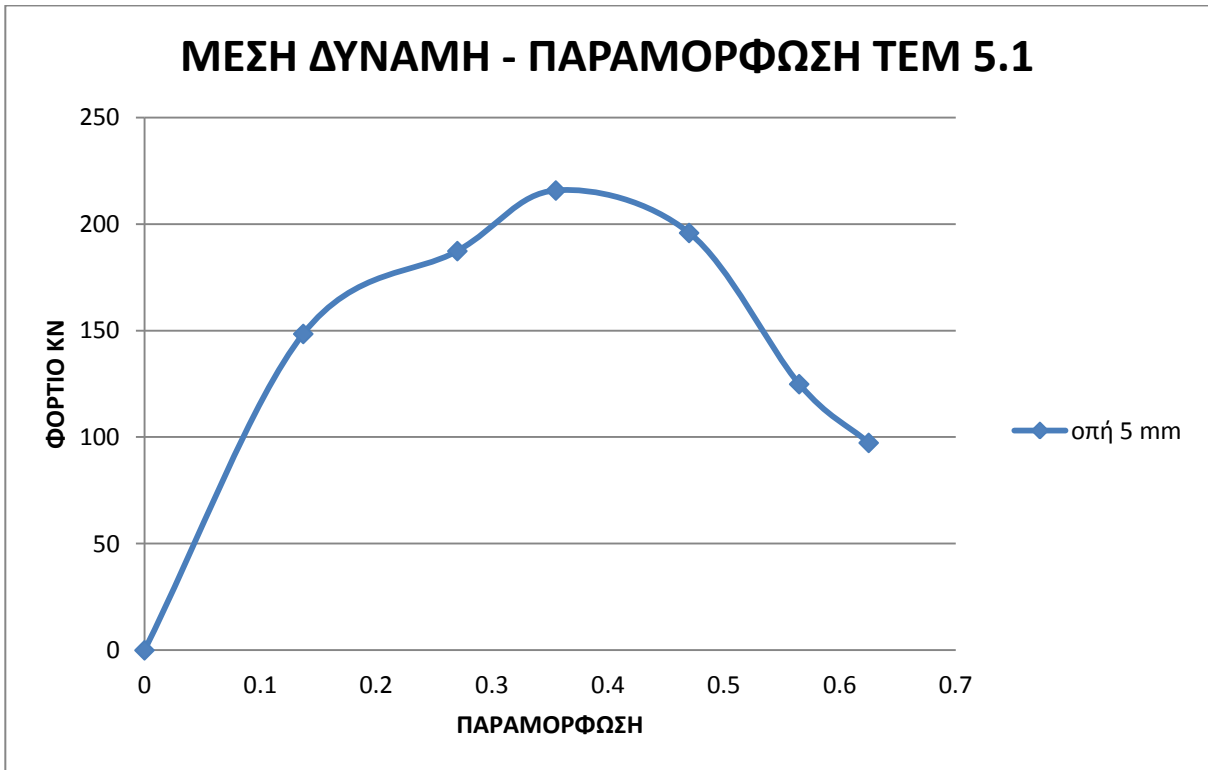
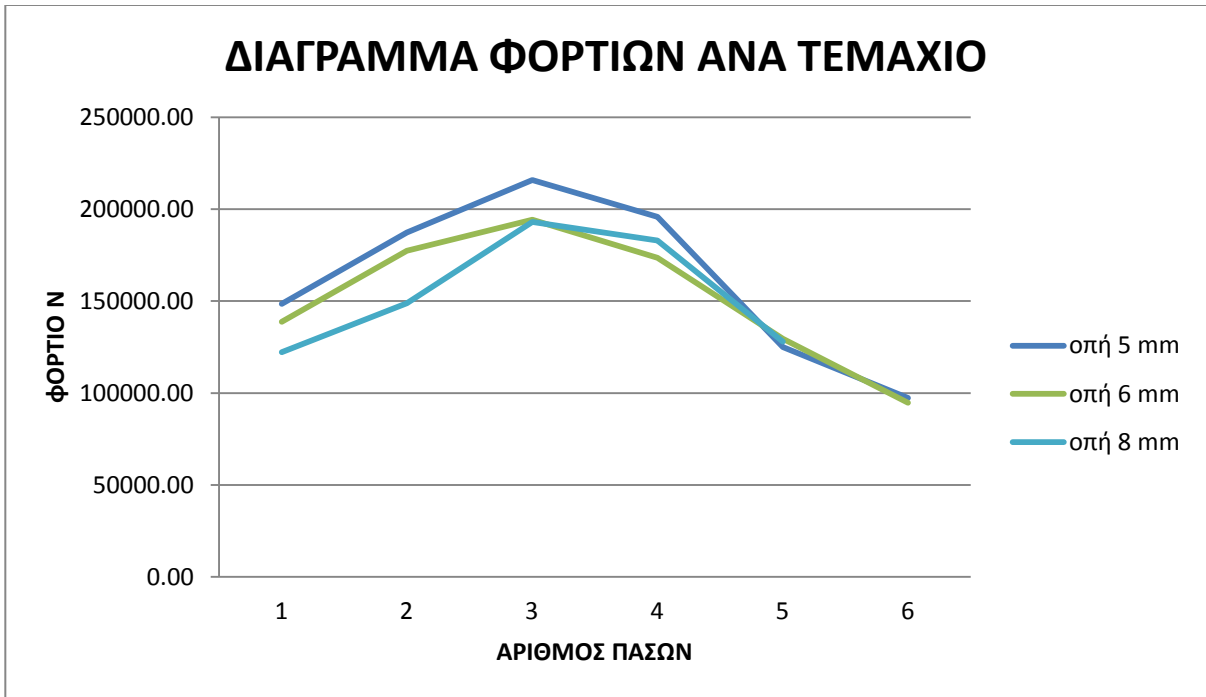
Επίσης, μετά από κάθε πάσο η διάμετρος του κάθε δοκιμίου ήταν μεγαλύτερη από την διάμετρο των αυλακώσεων των κυλίνδρων λόγω της ελαστικής επαναφοράς που έχει κάθε μέταλλο.

Ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα που αφορούν την τελική γεωμετρία των δοκιμίων καθώς και πίνακες με άλλα μεγέθη που μας αφορούν(παραμόρφωση, τάσεις, ισχύς κλπ)

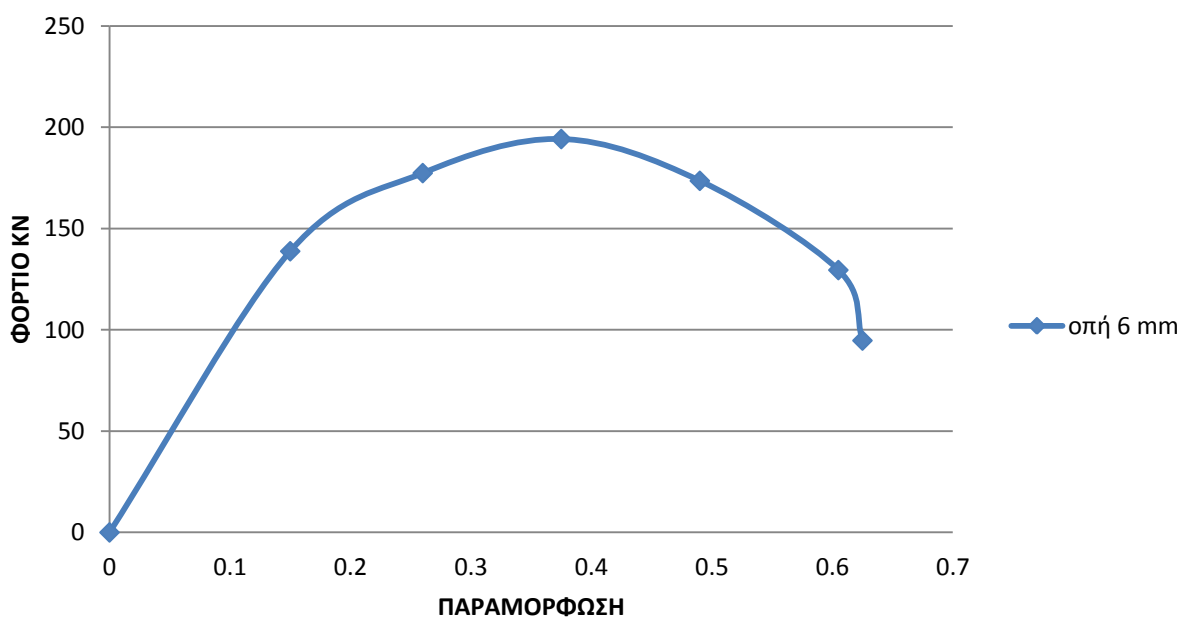
| Τεμάχιο | Αρ. Πάσων        |                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5    | 6   |
|---------|------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
|         | Εξωτ. Διαστάσεις | Διαστάσεις Οπών |       |       |       |       |      |     |
| 5.1     | <u>D</u>         | 20              | 17.26 | 14.6  | 12.9  | 10.6  | 8.7  | 7.5 |
|         | <u>L</u>         | 75              | 89    | 95.4  | 111   | 146   | 185  | 215 |
| 5.2     | <u>D</u>         | 20              | 17.15 | 14.85 | 12.65 | 10.65 | 8.85 | 7.6 |
|         | <u>L</u>         | 75              | 88    | 98    | 127   | 155   | 193  | 225 |
| 6.1     | <u>D</u>         | 20              | 17    | 14.8  | 12.5  | 10.2  | 7.9  | 7.5 |
|         | <u>L</u>         | 75              | 93    | 100   | 124   | 157   | 205  | 240 |
| 6.2     | <u>D</u>         | 20              | 17.15 | 14.8  | 12.5  | 10.15 | 7.9  | 7.4 |
|         | <u>L</u>         | 75              | 80    | 90    | 115   | 146   | 195  | 230 |
| 8.1     | <u>D</u>         | 20              | 17    | 15    | 12.6  | 10.45 | 9    | -   |
|         | <u>L</u>         | 75              | 80    | 92    | 115   | 155   | 190  | -   |
| 8.2     | <u>D</u>         | 20              | 17.1  | 14.65 | 12.5  | 10.6  | 8.8  | -   |
|         | <u>L</u>         | 75              | 90    | 95    | 114   | 154   | 193  | -   |



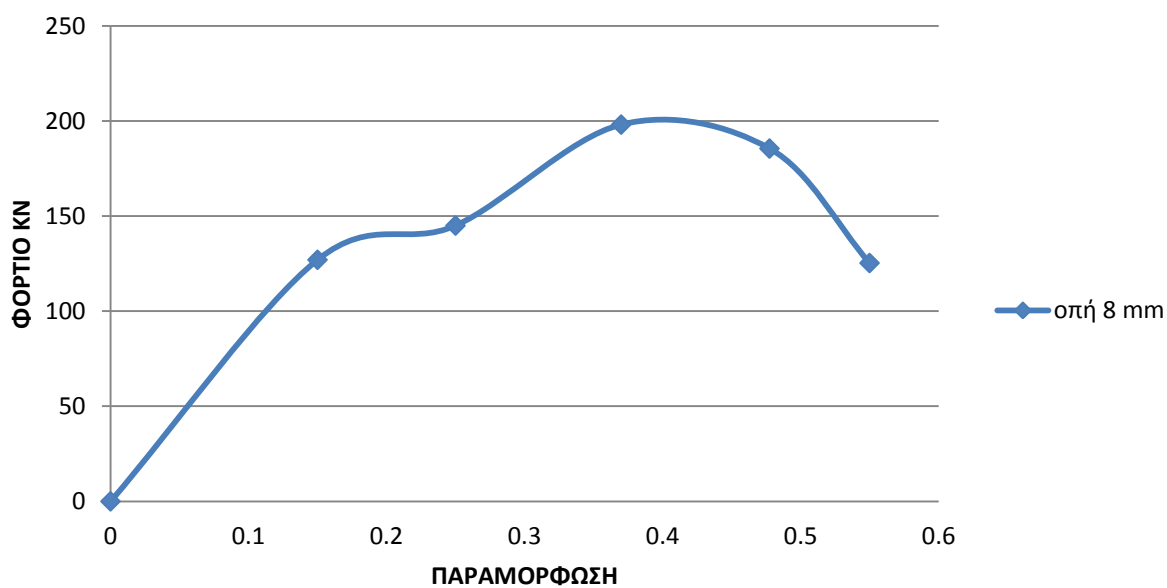
| Τεμάχιο | Αρ. Πάσων                      |                 | 1     | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         |          |
|---------|--------------------------------|-----------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|         | Εξωτ. Διαστάσεις               | Διαστάσεις Οπών | 17    | 14.5      | 12        | 10        | 8         | 6.5       |          |
| 5.1     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 5     | -13.70%   | -15.41%   | -11.64%   | -17.83%   | -17.92%   | -13.79%  |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.133    | 17.866    | 14.283    | 16.613    | 15.100    | 12.000   |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 148469.76 | 187356.00 | 215786.20 | 195869.72 | 124908.14 | 97339.78 |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             | 20              |       | 306.622   | 460.414   | 801.507   | 750.573   | 658.284   | 794.467  |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 264.615   | 389.458   | 708.181   | 616.750   | 540.290   | 684.885  |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 1.015     | 1.262     | 1.162     | 1.227     | 0.711     | 0.440    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 52.28 | 18.67%    | 7.19%     | 16.35%    | 31.53%    | 26.71%    | 16.22%   |
| 5.2     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 4.98  | -14.25%   | -13.41%   | -14.81%   | -15.81%   | -16.90%   | -14.12%  |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.493    | 16.613    | 16.248    | 15.492    | 14.697    | 12.247   |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 145810.35 | 175518.88 | 191739.48 | 194866.70 | 143603.77 | 91654.09 |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             |                 |       | 295.261   | 463.854   | 626.049   | 800.778   | 777.551   | 732.948  |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 253.187   | 401.646   | 533.301   | 674.173   | 646.134   | 629.424  |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 1.017     | 1.099     | 1.174     | 1.138     | 0.796     | 0.423    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 56.84 | 17.33%    | 11.36%    | 29.59%    | 22.05%    | 24.52%    | 16.58%   |
| 6.1     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 6.82  | -15.00%   | -12.94%   | -15.54%   | -18.40%   | -22.55%   | -5.06%   |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.974    | 16.248    | 16.613    | 16.613    | 16.613    | 6.928    |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 138796.05 | 177374.75 | 194194.49 | 173560.72 | 129502.09 | 94708.23 |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             |                 |       | 273.941   | 479.294   | 620.128   | 665.085   | 620.315   | 1338.856 |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 232.850   | 417.268   | 523.757   | 542.709   | 480.440   | 1271.066 |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 0.993     | 1.086     | 1.216     | 1.087     | 0.811     | 0.247    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 62.24 | 24.00%    | 7.53%     | 24.00%    | 26.61%    | 30.57%    | 17.07%   |
| 6.2     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 6.6   | -14.25%   | -13.70%   | -15.54%   | -18.80%   | -22.17%   | -6.33%   |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.493    | 16.793    | 16.613    | 16.793    | 16.432    | 7.746    |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 137656.22 | 174875.90 | 195290.48 | 168563.02 | 128318.43 | 86934.05 |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             |                 |       | 278.749   | 457.212   | 623.628   | 639.025   | 621.437   | 1099.211 |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 239.028   | 394.562   | 526.713   | 518.888   | 483.680   | 1029.641 |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 0.960     | 1.107     | 1.223     | 1.067     | 0.795     | 0.254    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 58.2  | 6.67%     | 12.50%    | 27.78%    | 26.96%    | 33.56%    | 17.95%   |
| 8.1     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 8.4   | -15.00%   | -11.76%   | -16.00%   | -17.06%   | -13.88%   | -        |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.974    | 15.492    | 16.971    | 16.062    | 13.191    |          |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 127003.25 | 145006.63 | 198081.60 | 185499.66 | 125308.12 |          |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             |                 |       | 250.666   | 410.955   | 619.223   | 735.213   | 755.953   |          |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 213.066   | 362.607   | 520.147   | 609.760   | 651.060   |          |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 0.908     | 0.847     | 1.267     | 1.123     | 0.623     | 0.000    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 62.16 | 6.67%     | 15.00%    | 25.00%    | 34.78%    | 22.58%    | -        |
| 8.2     | <u>Παραμόρφωση Ε</u>           | 20              | 8.3   | -14.50%   | -14.33%   | -14.68%   | -15.20%   | -16.98%   | -        |
|         | <u>Μήκος τόξου επαφής Lρ</u>   |                 |       | 18.655    | 17.146    | 16.062    | 15.100    | 14.697    |          |
|         | <u>Φορτίο λειτουργίας</u>      |                 |       | 122151.69 | 148820.66 | 193025.44 | 182913.14 | 127894.65 |          |
|         | <u>Μέση Τάση σ</u>             |                 |       | 245.212   | 381.067   | 637.534   | 771.183   | 692.493   |          |
|         | <u>Πραγματική Μέση τάση σΠ</u> |                 |       | 209.656   | 326.470   | 543.971   | 653.963   | 574.900   |          |
|         | <u>Μέση Ισχύς W</u>            |                 |       | 0.859     | 0.962     | 1.169     | 1.041     | 0.709     | 0.000    |
|         | <u>Μεταβολή μήκους Δι/Ιο</u>   | 75              | 69.94 | 20.00%    | 5.56%     | 20.00%    | 35.09%    | 25.32%    | -        |



### ΜΕΣΗ ΔΥΝΑΜΗ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΕΜ 6.1



### ΜΕΣΗ ΔΥΝΑΜΗ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΕΜ 8.1



Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα βλέπουμε ότι:

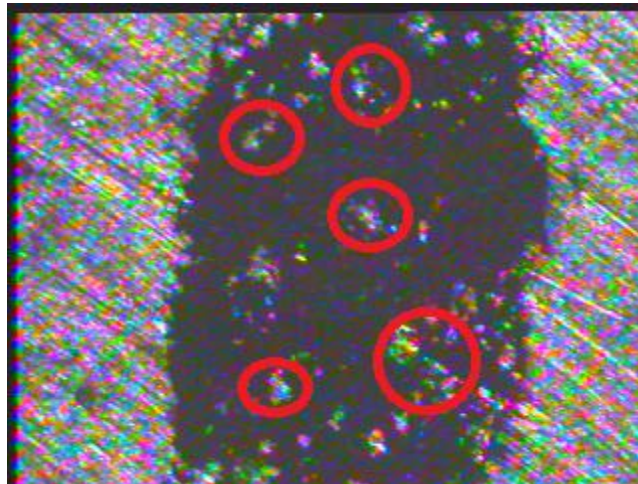
- Στο πρώτο πάσο ασκείται η μεγαλύτερη δύναμη στα τεμάχια 5.1-5.2 (~150 KN), στα τεμάχια 6.1-6.2 ασκείται δύναμη περίπου 140KN ενώ στα τεμάχια 8.1-8.2 ασκείται δύναμη περίπου 130KN. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος του κάθε τεμαχίου. Τα τεμάχια 5.1-5.2 έχουν πάχος τοιχώματος 7,5mm, τα τεμάχια 6.1-6.2 έχουν πάχος τοιχώματος 6,75mm ενώ τα τεμάχια 8.1-8.2 έχουν πάχος τοιχώματος 6mm. Η σκόνη στην αρχική της κατάσταση δεν ασκεί δύναμη αντίστασης στην κάθετη δύναμη που ασκούν τα ράουλα καθώς έχει αραιή δομή(μικρή πυκνότητα).
- Η Τάση αναπτύσσεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και συμπίεσης. Αναμένουμε γενικά να αυξάνεται λόγω εργοσκήρυνσης και δυσκολότερης συμπίεσης (μεγαλύτερη πυκνότητα και μικρότερη επιφάνεια διαφυγής της σκόνης) με την πρόοδο της κατεργασίας.
- Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο φορτίο ασκείται στο 3<sup>ο</sup> πάσο σε όλα τα δοκίμια ενώ στο 4<sup>ο</sup> πάσο όλα τα δοκίμια έχουν σχεδόν το ίδιο φορτίο. Πιθανόν να έχει ολοκληρωθεί η κρυσταλλική δομή της σκόνης και να έχει γίνει ένα σώμα.
- Μετά το τέταρτο πάσο παρατηρούμε ότι το φορτίο μειώνεται. Εάν λάβουμε υπόψη τα στοιχεία από το οπτικό μικροσκόπιο, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η σκόνη έγινε ένα σώμα στο 4<sup>ο</sup> πάσο ενώ στα επόμενα πάσα προκλήθηκαν αποξηλώσεις και ρηγματώσεις.
- Τα τεμάχια 8.1-8.2 στο 5<sup>ο</sup> πάσο παρουσίασαν σημάδια κροκοδειλίασης καθώς η κυλινδρική μπιγιέτα είχε ανοίξει στα άκρα της

## 5.2 Παρατήρηση δοκιμίων

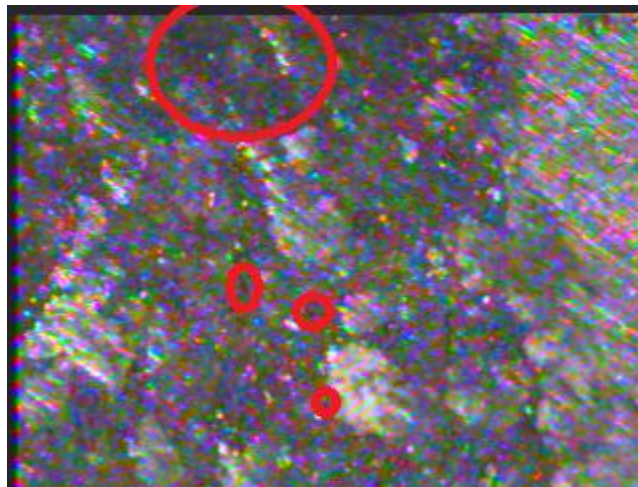
Για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων έγινε οπτικός έλεγχος καθώς και σκληρομέτρηση σε κάποια δείγματα από τα τελικά τεμάχια. Τα τελικά δείγματα κόπηκαν σε μικρά δοκίμια και αφού λειάνθηκαν, τοποθετήθηκαν στο μικροσκόπιο για οπτική παρατήρηση και στην συνέχεια έγινε σκληρομέτρηση σε κάθε δοκίμιο.

### 5.2.1 Χαρακτηρισμοί με οπτική Μικροσκοπία (OM)

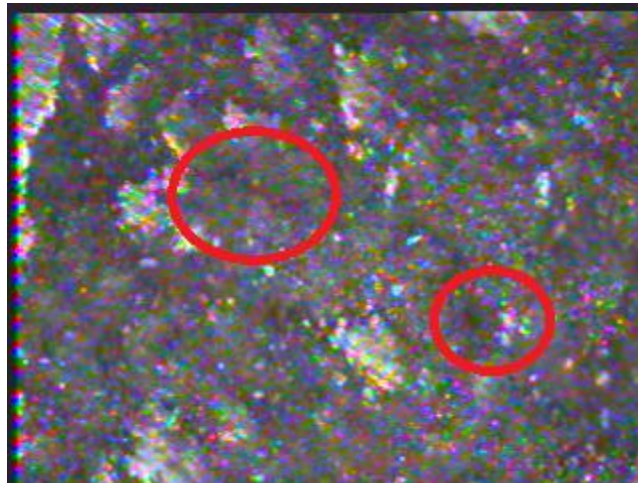
Οι φωτογραφίες που ακολουθούν αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα όλων όσων πάρθηκαν. Για όλα τα δείγματα είδαμε 5 εικόνες (X50, X100, X200). Τα δείγματα λειάνθηκαν πριν παρατηρηθούν στο μικροσκόπιο. Δεν χρησιμοποιήθηκε νερό ή κάποιο χημικό για την λείανση για να μην αλλοιωθεί το διβορίδιο του μαγνησίου. Αρκετές Περιοχές των δειγμάτων μας φαίνονται θολές διότι δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και όσο αυξάνει η μεγέθυνση το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο (η επιφάνεια του δείγματος παρουσιάζει «όρη και κοιλάδες»). Αυτό είναι απολύτως λογικό αφού μελετάμε κοκκώδες υλικό.



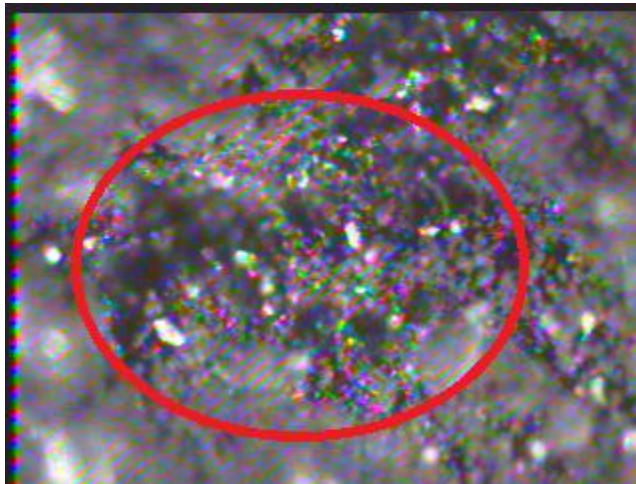
ΤΕΜΑΧΙΟ 5.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ50



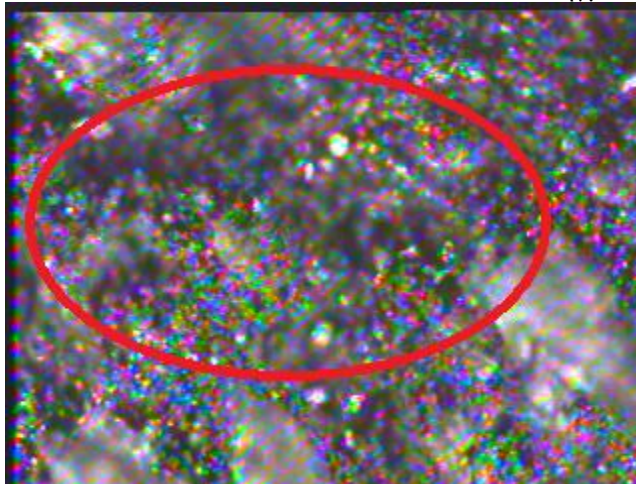
ΤΕΜΑΧΙΟ 5.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ100



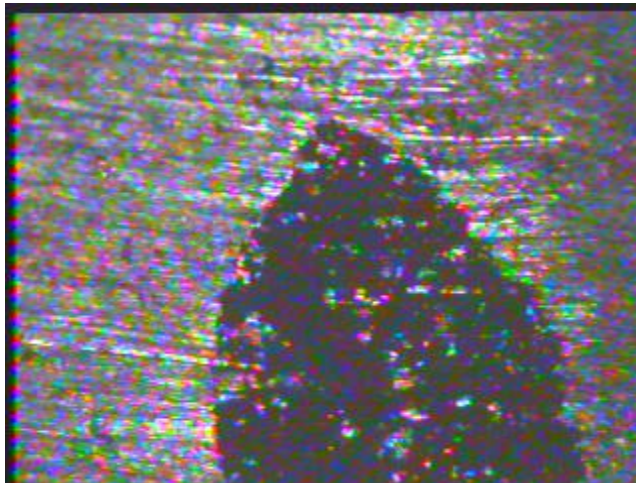
ΤΕΜΑΧΙΟ 5.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ100 Ρηγματώσεις και διακενώσεις



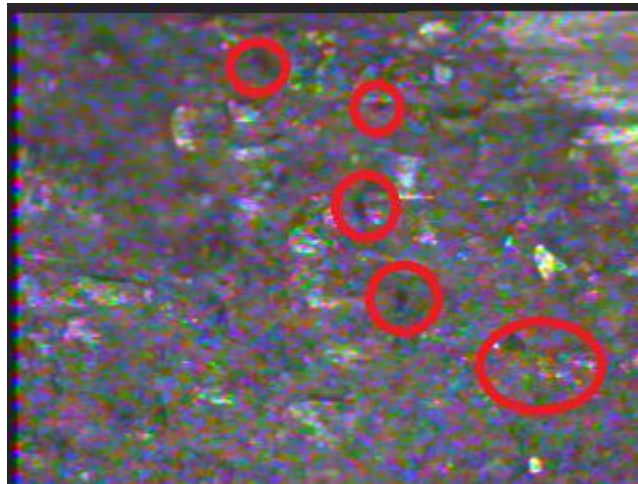
ΤΕΜΑΧΙΟ 5.1 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ200 Ρηγμάτωση



ΤΕΜΑΧΙΟ 5.1 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ200



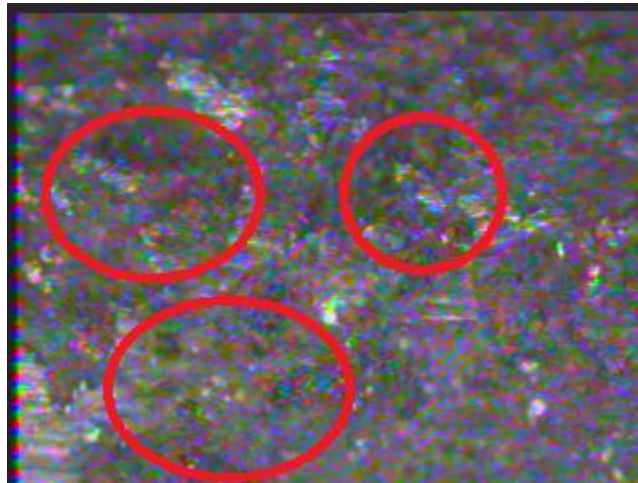
ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ50



ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ200

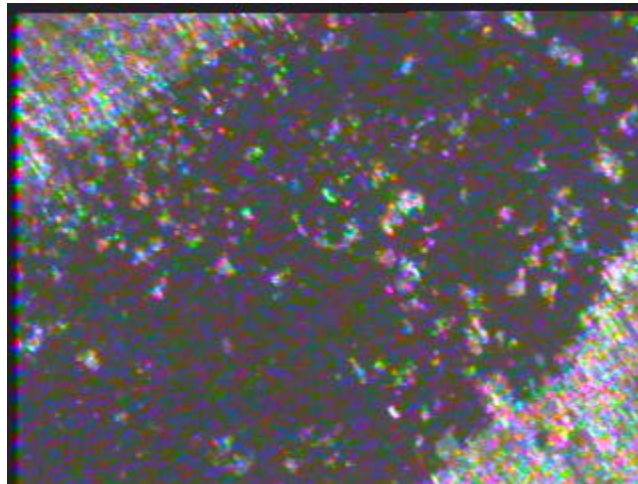


ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ200

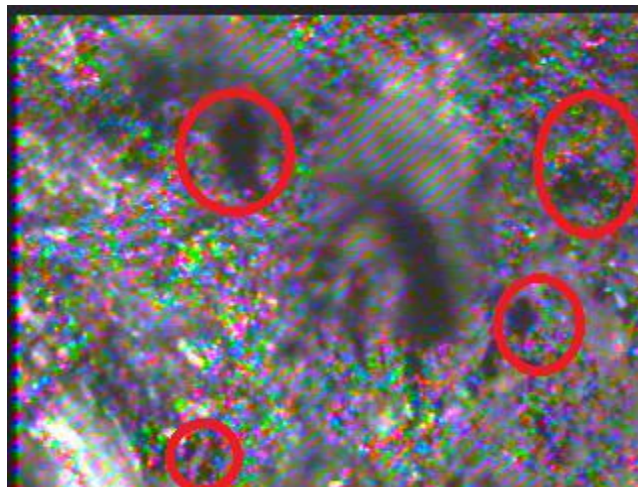


ΤΕΜΑΧΙΟ 5.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ Χ200

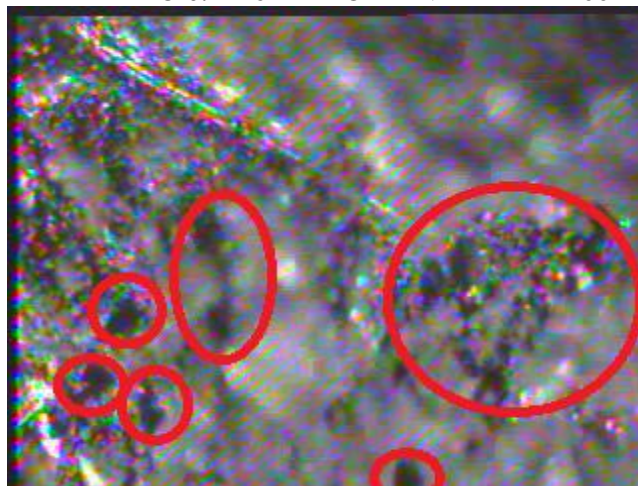




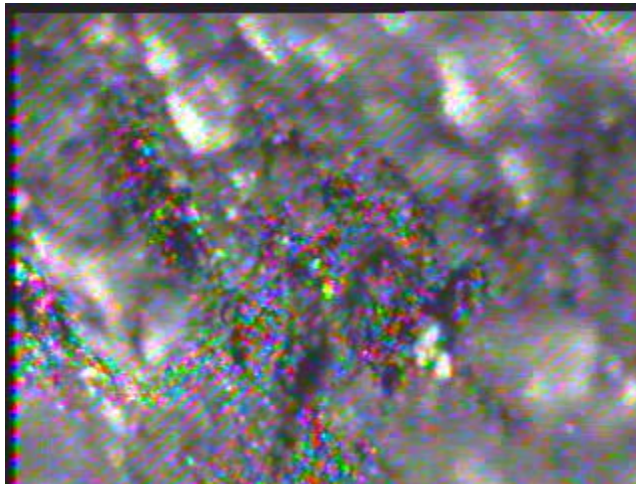
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X50



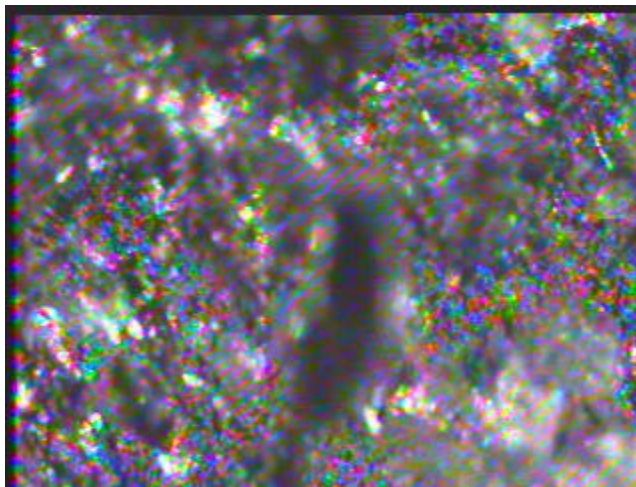
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



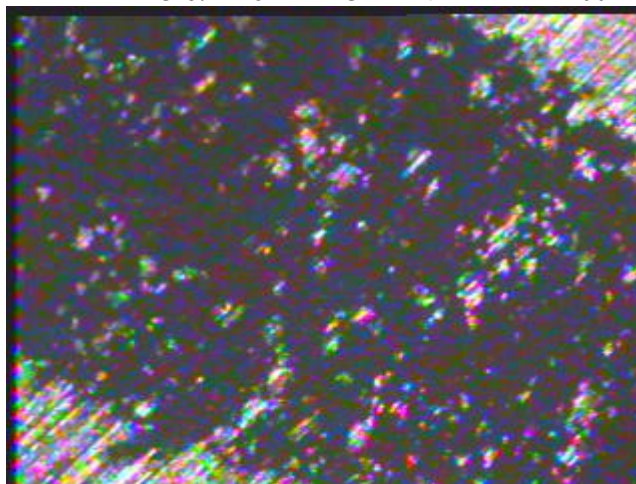
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



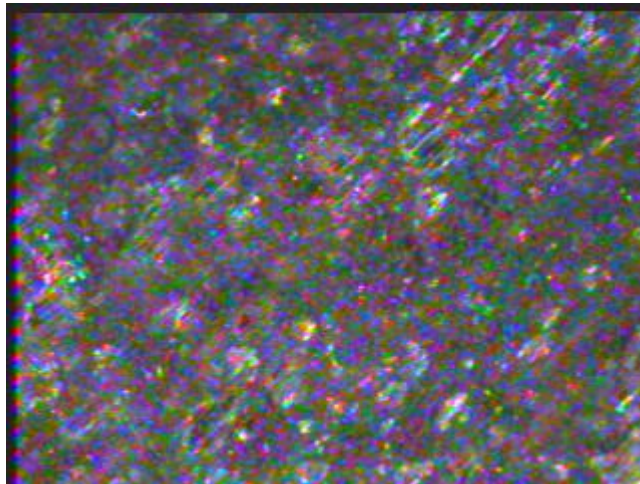
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



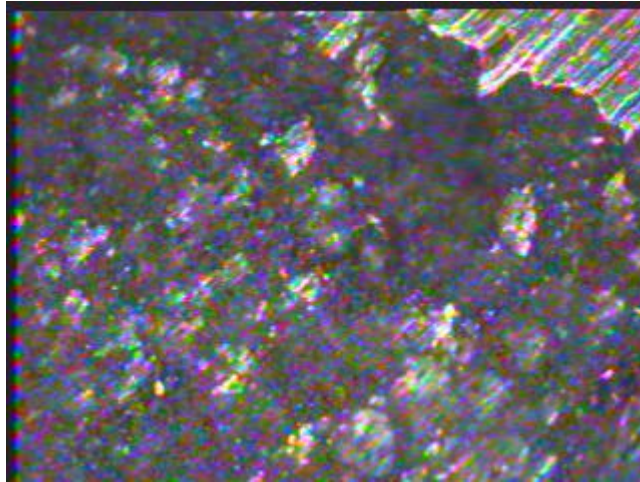
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



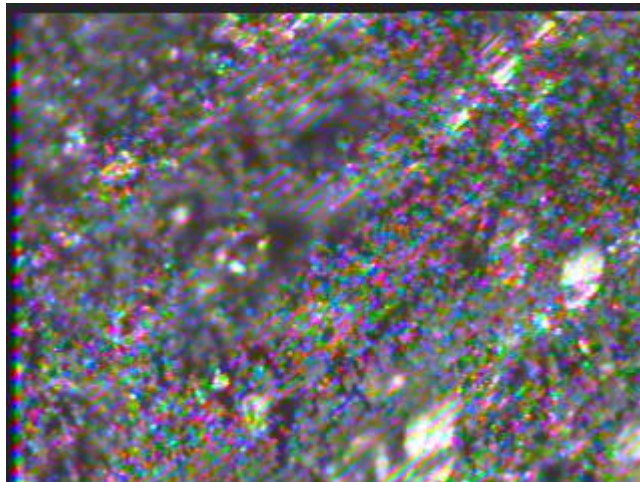
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X50



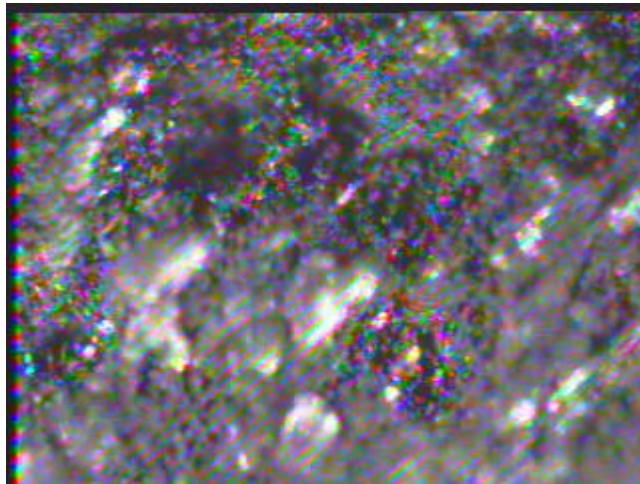
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



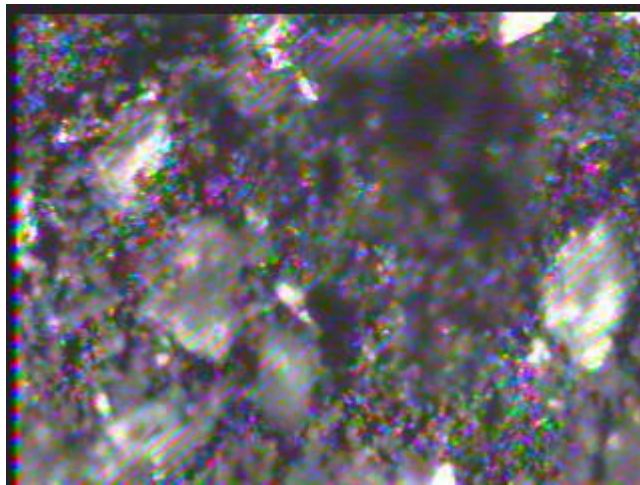
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



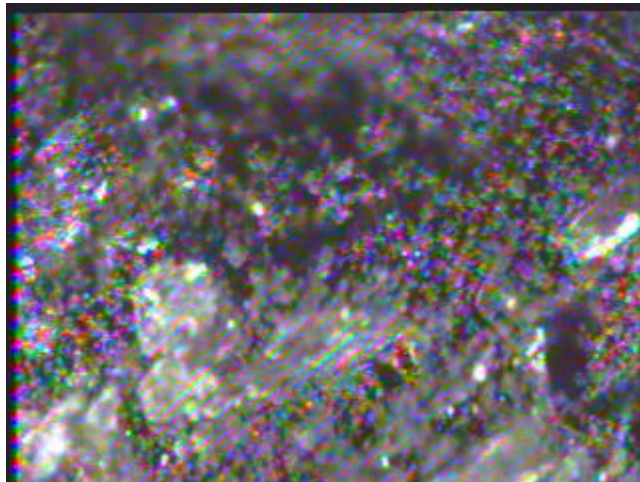
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



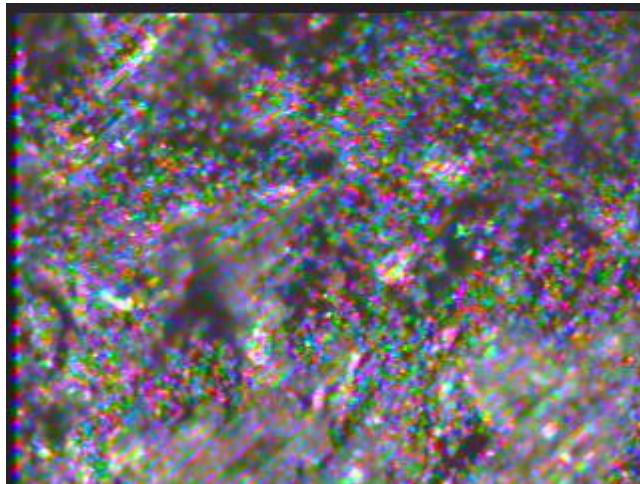
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



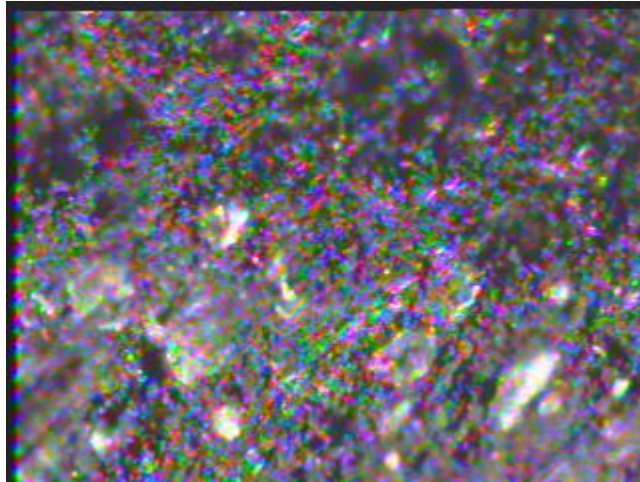
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



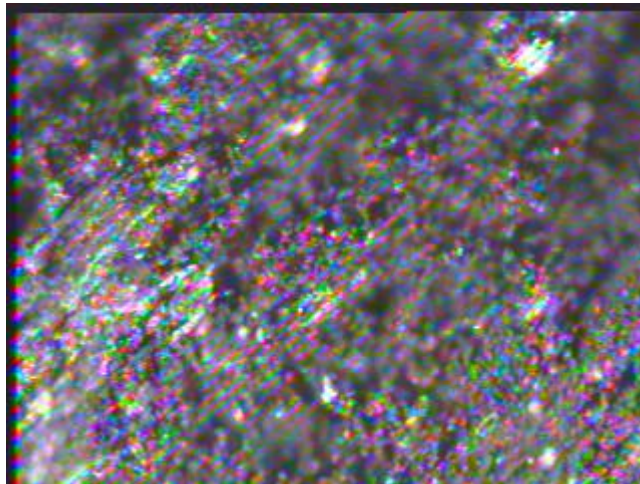
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



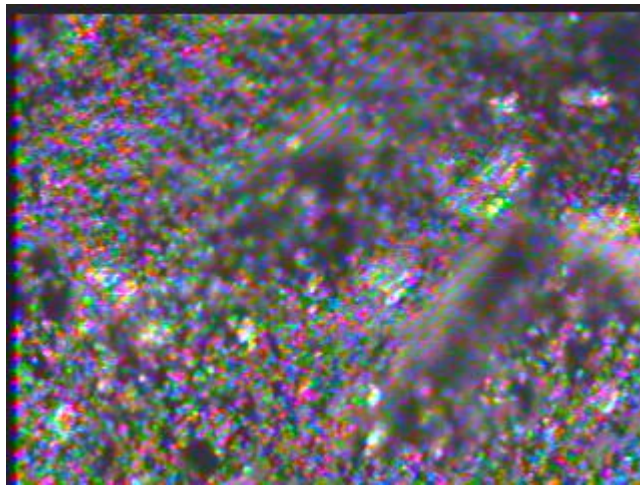
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



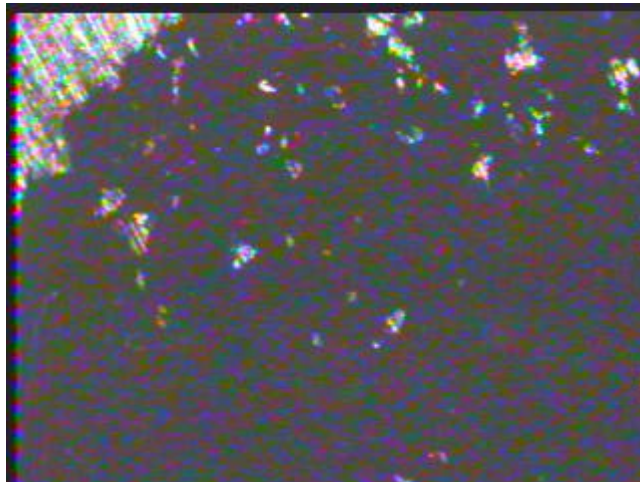
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



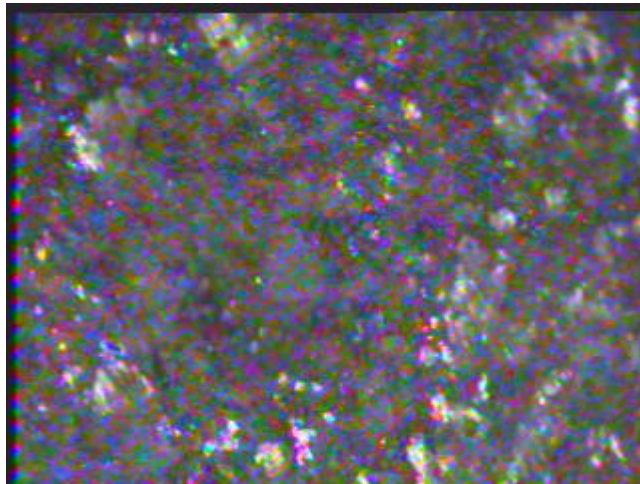
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



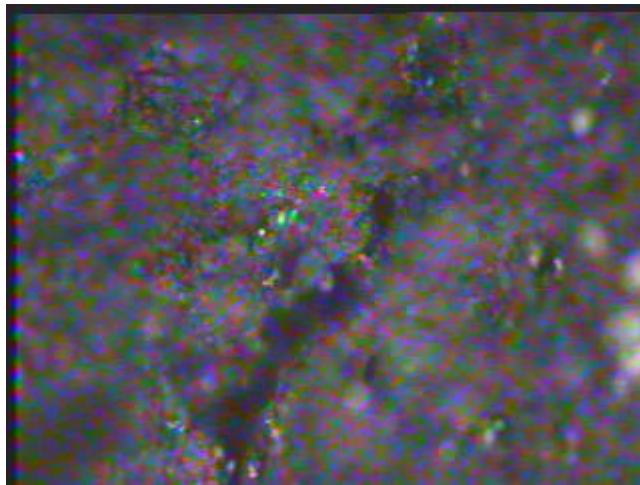
ΤΕΜΑΧΙΟ 6.2 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



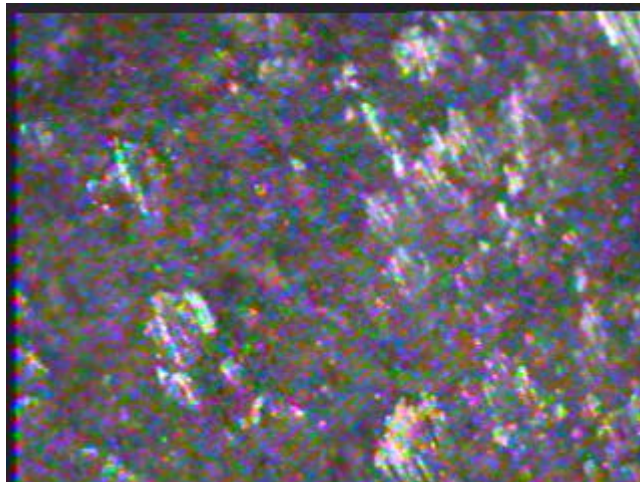
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6° ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X50



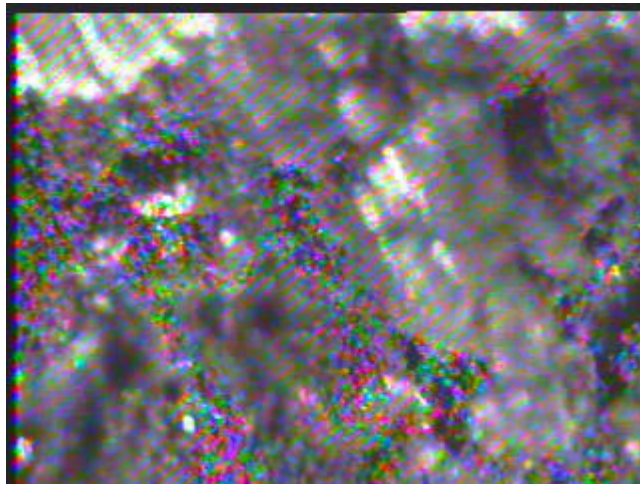
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



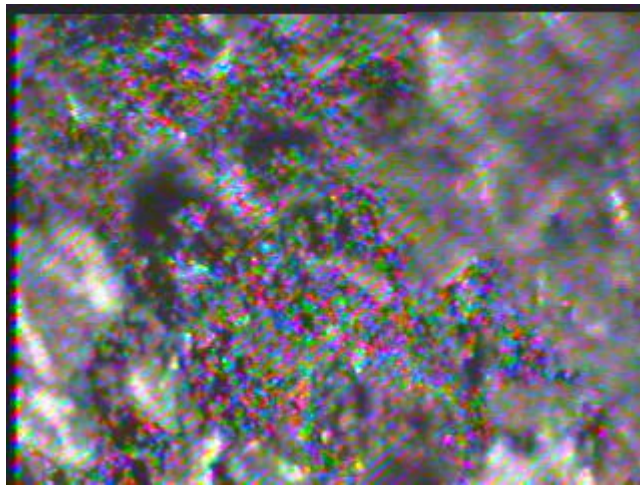
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



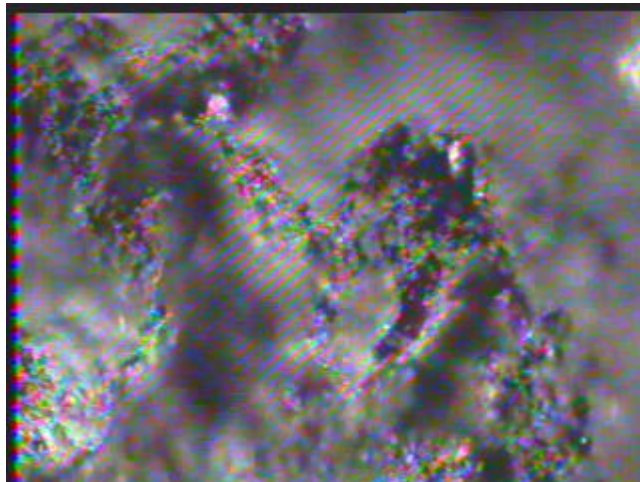
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200

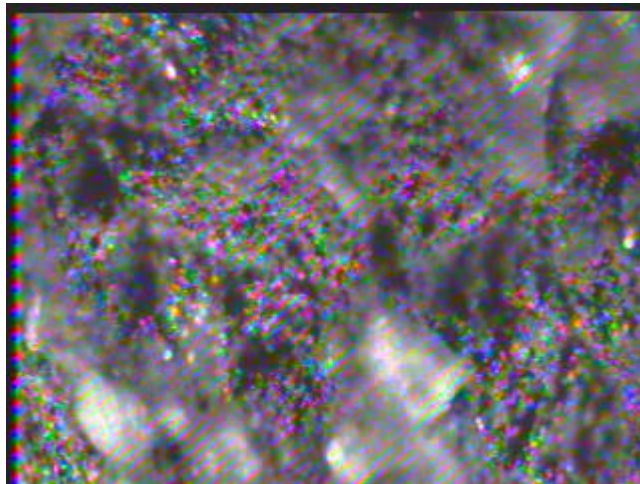


ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200

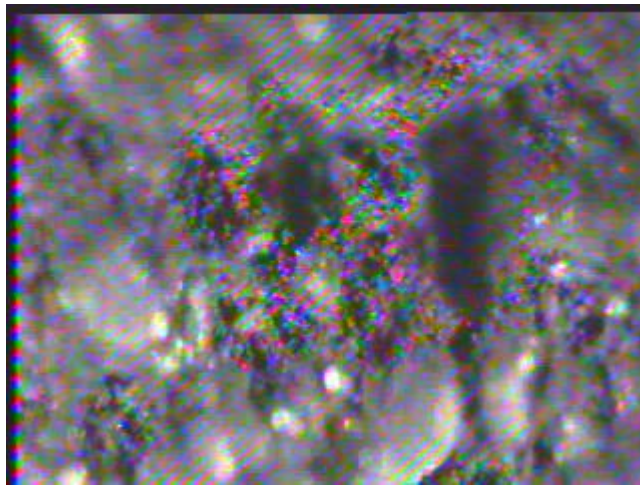


ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200

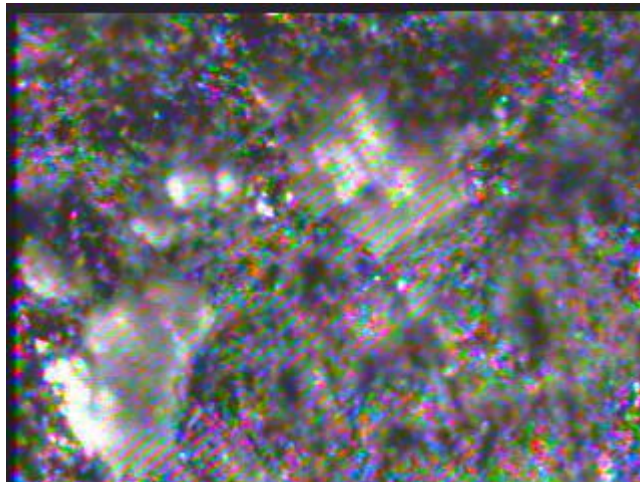




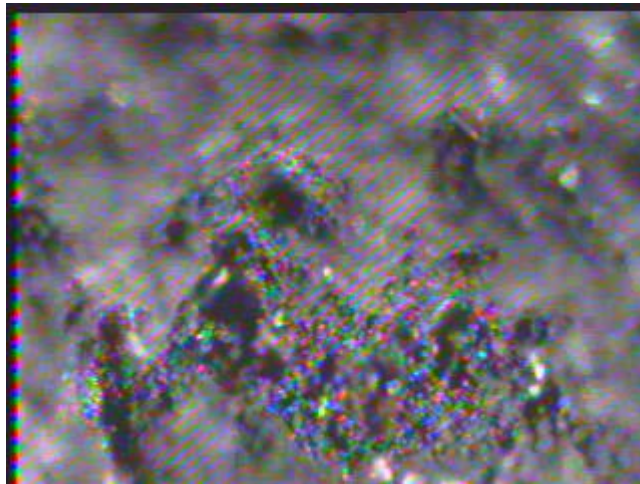
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



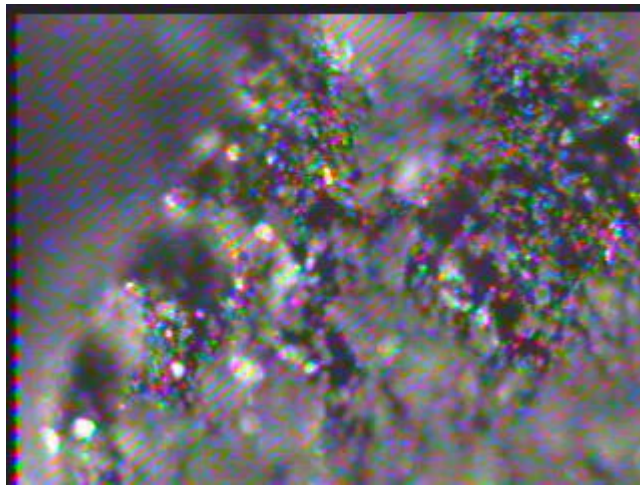
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



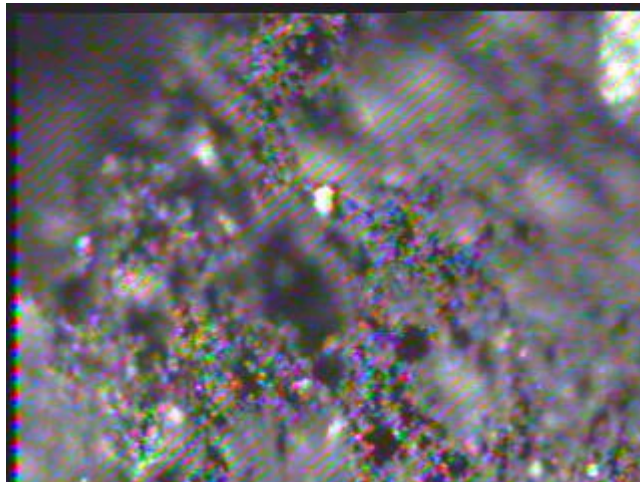
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



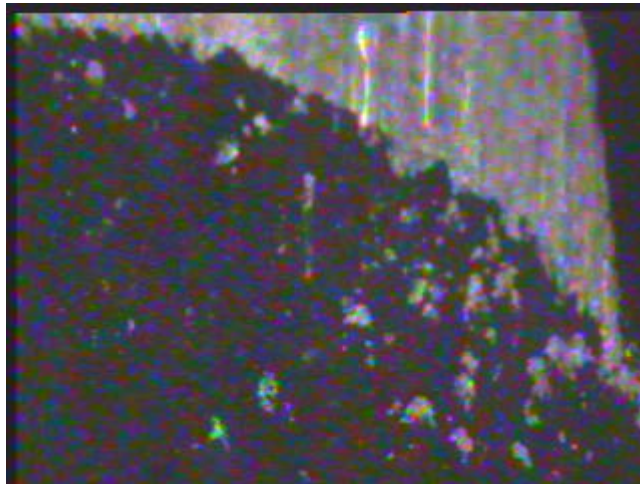
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 - 6° ΠΑΣΟ - ΑΝΑΛΥΣΗ X200



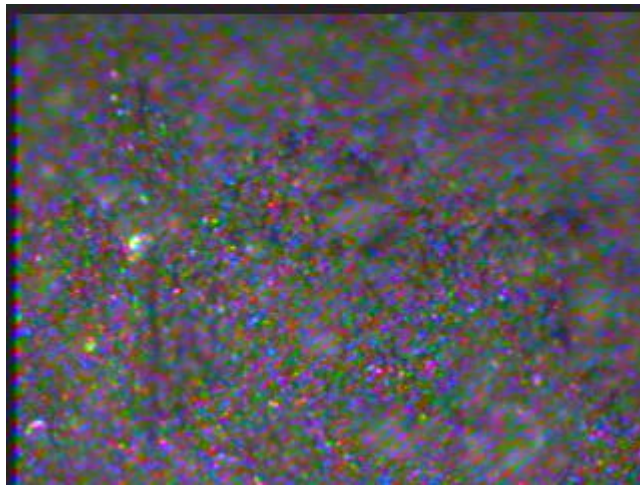
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 - 6° ΠΑΣΟ - ΑΝΑΛΥΣΗ X200



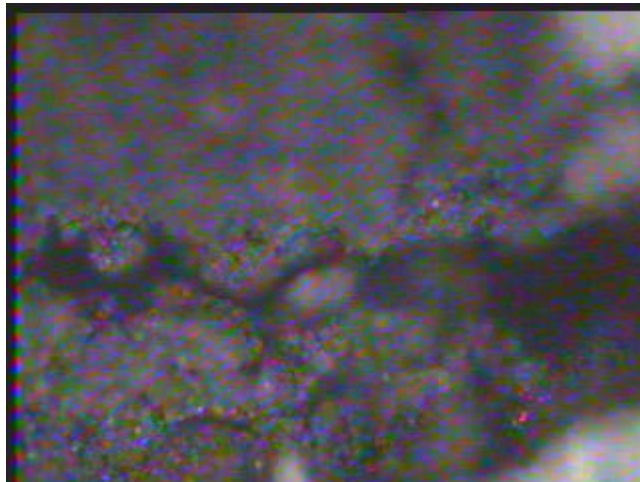
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.1 - 6° ΠΑΣΟ - ΑΝΑΛΥΣΗ X200



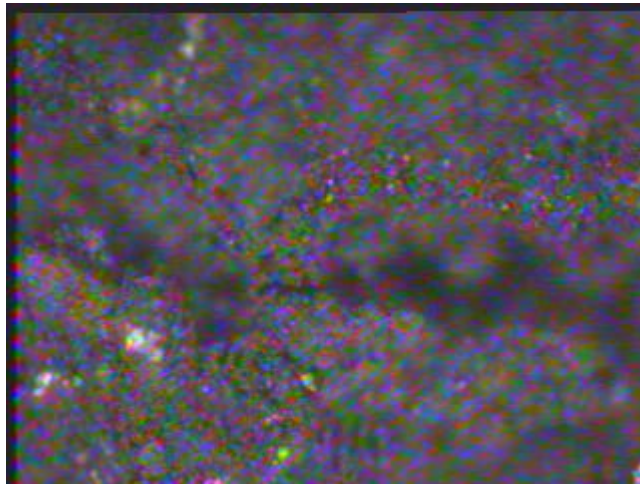
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X50



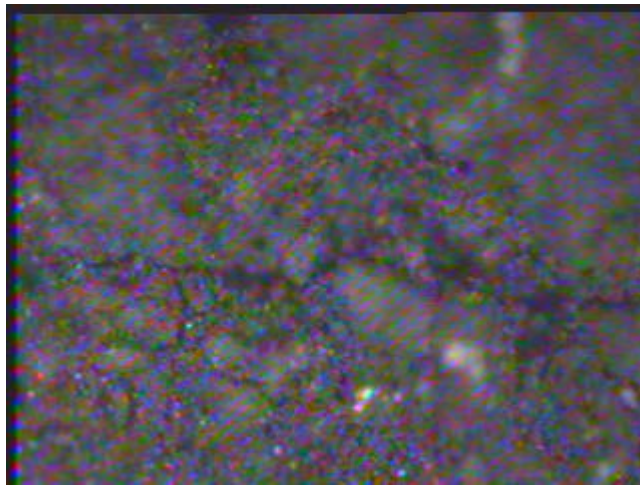
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



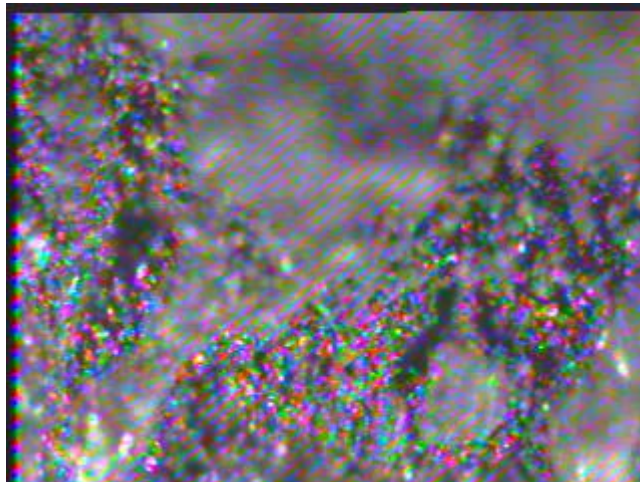
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



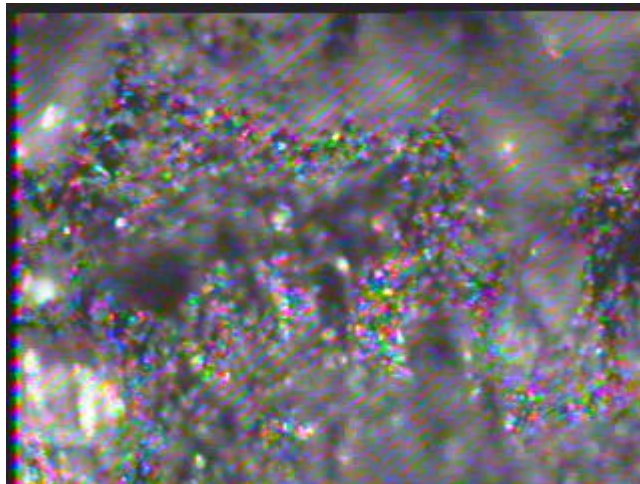
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



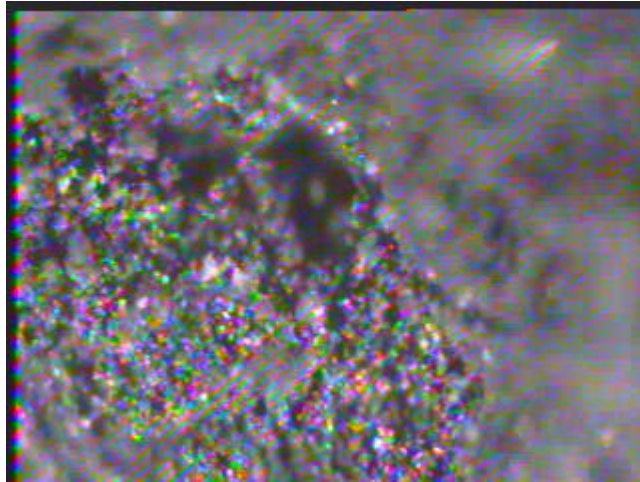
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X100



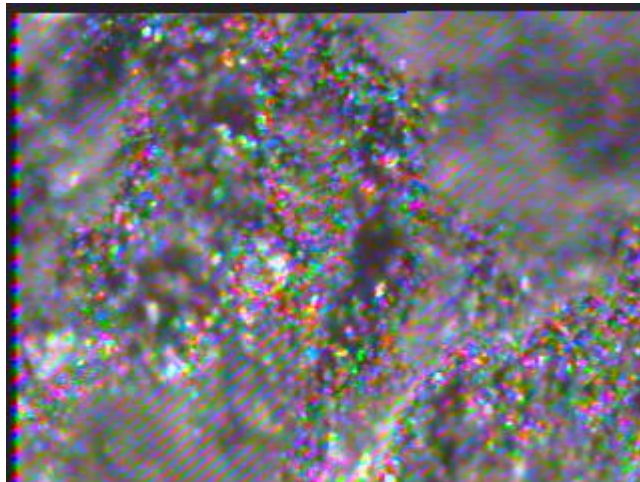
ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200



ΤΕΜΑΧΙΟ 8.2 – 6<sup>ο</sup> ΠΑΣΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ X200

### 5.2.2 Σκληρομέτρηση κατά Vickers

Για την καλύτερη μελέτη της τελικής δομής της σκόνης του διβοριδίου του μαγνησίου έγινε σκληρομέτρηση κατά Vickers για να διαπιστώσουμε ποιο από τα δοκίμια έχει την καλύτερη συμπίεση υλικού και με την μεγαλύτερη σκληρότητα.

Σύμφωνα με την θεωρία για την σκληρομέτρηση κατά Vickers ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις

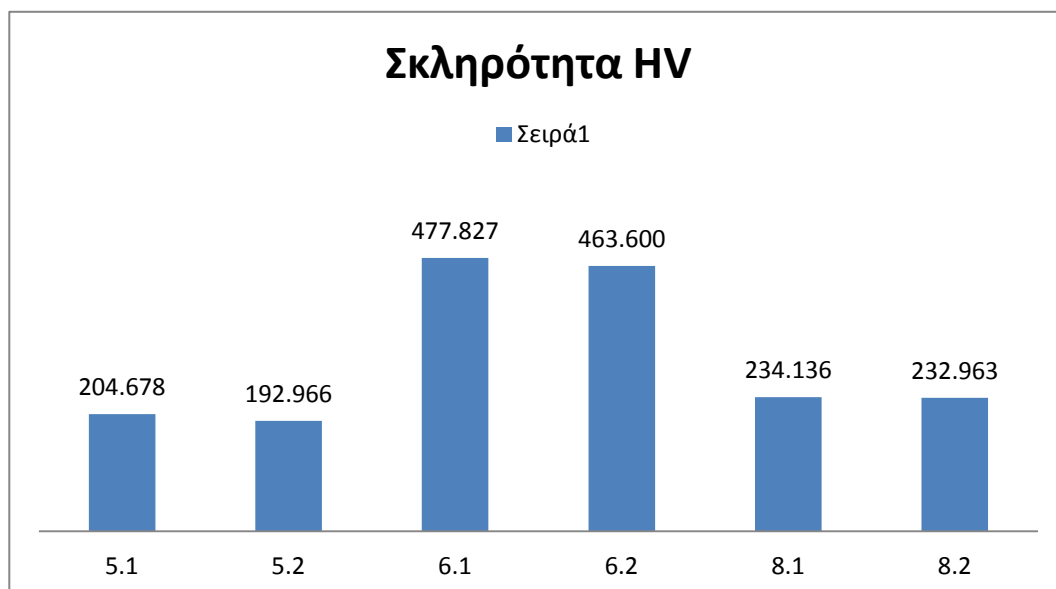
$$HV \left( \frac{Kp}{mm^2} \right) = \frac{F}{S} = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

όπου

$$d = \frac{d11 + d12}{2}$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σκληρότητα του κάθε τεμαχίου.

| TEMAXIO | F  | d1    | d2    | d     | HV      |
|---------|----|-------|-------|-------|---------|
| 5.1     | 10 | 0.331 | 0.271 | 0.301 | 204.678 |
| 5.2     | 10 | 0.338 | 0.282 | 0.310 | 192.966 |
| 6.1     | 10 | 0.191 | 0.203 | 0.197 | 477.827 |
| 6.2     | 10 | 0.196 | 0.204 | 0.200 | 463.600 |
| 8.1     | 20 | 0.372 | 0.424 | 0.398 | 234.136 |
| 8.2     | 20 | 0.372 | 0.426 | 0.399 | 232.963 |



### 5.3 Συμπεράσματα

1. Με ανάλυση του μικροσκοπίου 50:1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ,σε όλα τα δοκίμια, μόνο την ύπαρξη σωματιδίων αλουμινίου τα οποία πιθανόν να προήλθαν κατά την διαδικασία της κοπής των δειγμάτων. Στην επόμενη ανάλυση 100:1 φαίνεται καλύτερα η δομή της σκόνης και είναι διακριτό ότι έχει γίνει ένα σώμα. Είναι διακριτές οι εκδορές που έχουν δημιουργηθεί από την μεγάλη συμπίεση και συγκεκριμένα υπάρχουν κατά κύριο λόγο ρηγματώσεις και αποκολλήσεις. Μερικά σημεία είναι πορώδη αλλά σε μεγαλύτερο ποσοστό υπάρχουν ρηγματώσεις και αποκολλήσεις. Αυτό δείχνει ότι η σκόνη συμπίεστηκε και μορφοποιήθηκε στο μεγαλύτερο ποσοστό της πριν τα 6 πάσα και συγκεκριμένα επειδή και τα δοκίμια 8.1 και 8.2 ,τα οποία περάσαμε από 5 πάσα, παρουσίασαν την ίδια χαρακτηριστικά τότε μάλλον θα έπρεπε να σταματήσουμε την διαδικασία πριν και το 5<sup>ο</sup> πάσο.
2. Αν παρατηρήσουμε τα διαγράμματα φορτίου, βλέπουμε ότι το μέγιστο φορτίο ασκείται στο 3 πάσο που πιθανόν η σκόνη έχει συμπυκωθεί και έχει γίνει ένα σώμα. Στο 4<sup>ο</sup> πάσο βλέπουμε ότι το φορτίο αρχίζει να μειώνεται, κάτι το οποίο φαίνεται λογικό καθώς μειώνεται και το τόξο επαφής.
3. Θα ήταν σκόπιμο να αφήναμε τα μισά δοκίμια στο 3<sup>ο</sup> πάσο και να παρατηρούσαμε την δομή τους καθώς θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε σε ποιο πάσο θα είχαμε τα βέλτιστα αποτελέσματα. Συμπερασματικά, από τις εικόνες στο οπτικό μικροσκόπιο βλέπουμε γενικά ότι, γενικά η πρόσφυση μεταξύ μετάλλου και σκόνης είναι αρκετά καλή για κάθε υλικό ενώ παράλληλα, οι ακαθαρσίες και η εισχώρηση του μετάλλου της μήτρας στην σκόνη δεν είναι εμφανής
4. Την μεγαλύτερη σκληρότητα την έχουν τα τεμάχια 6.1, 6.2 και είναι σχεδόν διπλάσια από τα υπόλοιπα τεμάχια.
5. Βάση της σκληρομέτρησης και της οπτικής παρατήρησης καταλήγουμε ότι την καλύτερη δομή την έχουν τα τεμάχια 6.1-6.2 επομένως είναι τα καταλληλότερα για αυτήν την κατεργασία.

## 6. Εφαρμογές Υπεραγώγιμων υλικών

### 6.1. Υπολογιστές

Το φαινόμενο Josephson (έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο) γρήγορα προσέελκυσε το ενδιαφέρον για την χρήση του σε υπολογιστές επειδή οι επαφές Josephson μπορούν γρήγορα να αλλάξουν από την υπεραγώγιμη στην κανονική κατάσταση και έχουν πολύ μικρή σκέδαση. Σε έναν Josephson υπολογιστή, η υπεραγώγιμη κατάσταση και η κατάσταση αντίστασης της επαφής αντιστοιχούν στις λογικές καταστάσεις 0 και 1, αντίστοιχα.

Ο χρόνος μετάβασης από την υπεραγώγιμη κατάσταση σε αυτήν της αντίστασης σε μια απλή επαφή, δηλαδή ο χρόνος εναλλαγής είναι, όπου είναι το κβάντο της ροής και η τάση μεταξύ των άκρων της επαφής. Ωστόσο, μια ρεαλιστική πύλη Josephson περιορισμένου μεγέθους έχει μια πεπερασμένη χωρητικότητα επαφής. Η ταχύτητα εναλλαγής περιορίζεται σχεδόν πάντα από το χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί η χωρητικότητα επαφής δια μέσου του εξωτερικού αντιστάτη  $R$ . Μια επαφή αρκετών τετραγωνικών μικρόμετρων που έχει αξιοπρόσεκτη χωρητικότητα (τυπικά της τάξης του έως pF) και τυπικό φορτίο αντίστασης από  $10\Psi$ , ο χρόνος εναλλαγής μπορεί να είναι κάτω από 10 picosec. Στις υπάρχουσες συσκευές, η ισχύ που καταναλώνεται από τη λειτουργία εναλλαγής είναι αρκετά microwatt.

Η IBM άρχισε να ερευνά υπεραγώγιμα computer, χρησιμοποιώντας επαφές Josephson για μνήμες και λογικά κυκλώματα το 1964. Ο Juri Matisoo της IBM παρουσίασε ένα λογικό κύκλωμα με λειτουργία της τάξης των nanosecond το 1966.

Στη βάση αυτών των ενθαρρυντικών αποτελεσμάτων, η IBM ξεκίνησε ένα εντατικό πρόγραμμα έρευνας χρησιμοποιώντας ένα πολύ υψηλής επίδοσης υπολογιστή.

Μια από τις πιο σημαντικές επιτεύξεις της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας που έκανε εφικτή να αναπτυχθούν επαφές Josephson πάνω σε chip. Η τεχνική περιλαμβάνει κατασκευές επαφών από κράματα μολύβδου, ινδίου και χρυσού. Λογικά κυκλώματα και μνήμες βασισμένα στη τεχνολογία κράματος μολύβδου είχαν μοναδικά χαρακτηριστικά επίδοσης και προσέελκυσε το ενδιαφέρον και την προσοχή παγκοσμίως.



Σαν αποτέλεσμα πολλά ινστιτούτα παγκοσμίως και ιδιαίτερα στην Ιαπωνία , ξεκίνησαν να δουλεύουν πάνω σε εφαρμογές ψηφιακές που χρησιμοποιούν Josephson επαφές γύρω στο 1980. Η εργασία της Ιαπωνίας σε συσκευές Josephson είναι μέρος της μεγαλύτερης προσπάθειας για να βρεθούν υποψηφίες τεχνικές για την επόμενη γενιά των τεχνολογιών computer για να αντικαταστήσουν ίσως τη βασισμένη στο πυρίτιο τεχνολογία. Στο πνεύμα αυτών των επιτυχιών η IBM ανακοίνωσε το 1983 ότι σταμάτησε η έρευνα για το Josephson-computer. Η ανακοίνωση της IBM είχε μεγάλο αντίκτυπο στην έρευνα ψηφιακών ηλεκτρονικών Josephson, αν και εργαστήρια στην Ιαπωνία συνέχισαν τις προσπάθειες τους στην ανάπτυξη ψηφιακών Josephson συσκευών έχοντας την πεποίθηση ότι παρέχουν μια μοναδική υπεροχή έναντι του πυριτίου για την κατασκευή υψηλής ταχύτητας ψηφιακών συστημάτων.

Οι πιο σημαντικοί στόχοι για να αναπτυχθούν συσκευές Josephson είναι η μεγάλη ταχύτητα εναλλαγής και η ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Στην πράξη , λογικές πύλες Josephson που λειτουργούν σε λιγότερο από 10 picosec έχουν παρουσιαστεί σε διάφορες συσκευές. Η γρηγορότερη καθυστέρηση εναλλαγής που έχει αναφερθεί είναι 4.2 picosec/πύλη, και επιτεύχθηκε στην εταιρία Nippon Telephone and Telegraph σε λογική πύλη με επαφή 1,5 mm<sup>2</sup>. Αυτός ο χρόνος εναλλαγής υπερέρχει από αυτόν οποιουδήποτε συστήματος με ημιαγωγούς.

Χάρη σε αυτές τις ταχύτητες εναλλαγής και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος, το γεγονός ότι οι συσκευές Josephson βασίζονται σε υπεραγωγούς συνεπάγονται άλλα πλεονεκτήματα για την κατασκευή ψηφιακών συστημάτων.

Το σημαντικότερο είναι ότι κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει υπεραγώγιμες μικροκυματικές γραμμές μεταφοράς και υπεραγώγιμες κεραίες γήινου επιπέδου. Οι μικροκυματικές γραμμές είναι σχεδόν χωρίς απώλειες σε συχνότητες πάνω από 1 THz, όταν είναι κατασκευασμένες με υπεραγωγό. Εάν η γραμμή τερματίζεται σε αντίσταση προσαρμοσμένη στην εμπέδηση της γραμμής , μπορεί να μεταφέρει σήματα υψηλής συχνότητας χωρίς σκέδαση. Αυτές οι απαλλαγμένες από σκέδαση γραμμές δεν μπορούν να επιτευχθούν με ημιαγώγιμα κυκλώματα.

Για να βεβαιωθεί ωστόσο η γρήγορη και σταθερή λειτουργία των επαφών Josephson σε κυκλώματα μεγάλης ολοκλήρωσης, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν επαφές χρησιμοποιώντας υπεραγωγούς με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία. Τέτοιες επαφές διατηρούν τη σταθερή λειτουργία τους ακόμη και με την παρουσία μικρών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Ακόμη περισσότερο τα υπεραγώγιμα υλικά υψηλής θερμοκρασίας έχουν μεγάλες

τάσεις μεταξύ των άκρων της επαφής από τα χαμηλής θερμοκρασίας δίνοντας μεγαλύτερη ταχύτητα εναλλαγής. Οι πύλες που κατασκευάζονται από υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς χρησιμοποιούνται για γρηγορότερα λογικά κυκλώματα και μνήμης.

### 6.2. Μετρητική τεχνολογία

Τα SQUID επίσης χρησιμοποιούνται από τους γεωλόγους για να ανιχνεύσουν κοιτάσματα πετρελαίου και ορυκτών τα οποία προκαλούν μικρές τοπικές μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο της γης.

Χρησιμοποιούνται επίσης στην έρευνα και στην μελέτη των τεκτονικών πλακών της γης και για την χρονολόγηση των διαφόρων υποστρωμάτων του υπεδάφους. Μάλιστα όσο τα SQUID κατασκευάζονται από υπεραγωγούς με κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από το σημείο ζέσεως του αζώτου, θα βρίσκουν όλο και μεγαλύτερες εφαρμογές χάρη στο μικρό τους μέγεθος και την εύκολη συντήρησή.

Τέλος οι φυσικοί και οι χημικοί χρησιμοποιούν το SQUID στην έρευνα για την δομή των διαφόρων σωματιδίων και στην μέτρηση της κρίσιμης θερμοκρασίας και της κρίσιμης πυκνότητας ρευμάτων των υπεραγωγών.

### 6.3. Υπεραγώγιμες ηλεκτρικές μηχανές

Παρόλο που το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας έχει γίνει γνωστό για πάνω από 65 χρόνια , οι πρακτικές του εφαρμογές σε ηλεκτρικές μηχανές έχουν εφαρμοστεί μόνο στα τελευταία 30 χρόνια. Η ανάπτυξη ενός ουσιαστικά σταθερού υπεραγωγού για ένα μεγάλο παλλόμενο μαγνήτη ήταν το πρώτο μεγάλο βήμα που οδήγησε στην ανάπτυξη της υπεραγώγιμης τεχνολογίας σε υψηλής ισχύος ηλεκτρικές και μηχανικές διατάξεις.

Συνοπτικά η χρήση της υπεραγώγιμης τεχνολογίας κάνει τον εξοπλισμό ηλεκτρικής ισχύος χαμηλότερο , ελαφρύτερο και πιο αποδοτικό και επιπρόσθετα βελτιώνει την δυναμική απόκριση. Υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί με επαρκή μηχανική δύναμη και μεγάλη δυνατότητα μεταφοράς ρεύματος θα έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην επίδοση των κινητήρων , των υπερτροφοδοτούμενων γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς.

Αυτά τα πλεονεκτήματα οφείλονται σε τρεις ιδιότητες:

Οι υπεραγωγοί μεταφέρουν τεράστια ρεύματα χωρίς καμιά απώλεια και ελαχιστοποιούν το σίδηρο σε μερικά μέρη από τη μηχανή(αντιθέτως χρησιμοποιούνται χάλκινες περιελίξεις) οπότε και μειώνεται το βάρος και το μέγεθος.

Οι υπεραγωγοί μπορούν να παράγουν μεγάλης πυκνότητας μαγνητικές ροές που θα οδηγήσουν σε αξιοσημείωτη μείωση στο φυσικό μέγεθος του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας στην οποία δουλεύουν οι υπεραγωγοί, αποφεύγονται οι απώλειες λόγω του φαινόμενο Joule. Άρα αυξάνεται η ικανότητα ισχύος εξόδου της μηχανής όσο και η αποδοτικότητά της.

Ειδικά ως προς τη μείωση του μεγέθους, αυτή καθορίζεται από ένα συντελεστή που μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$R_{out} = \frac{KVA}{D^2 LN}$$

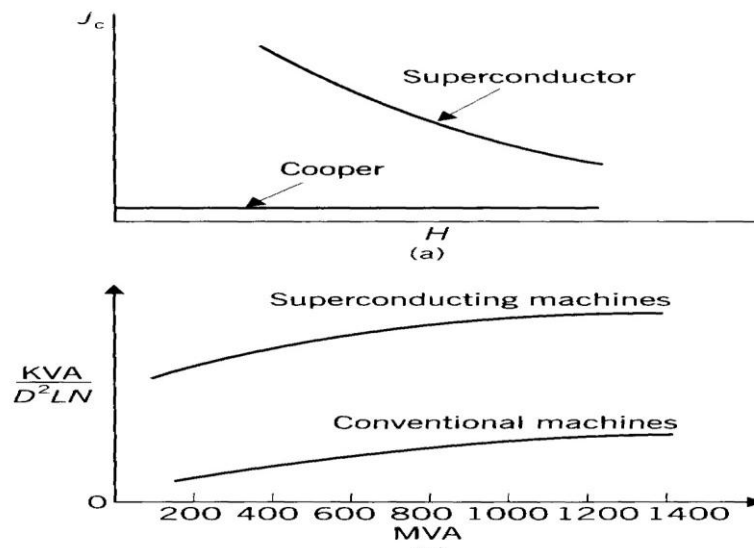
όπου KVA = Δείκτης της ισχύος για υπεραγωγίμη μηχανή

D = Η διάμετρος του στάτορα.

L = Σο μήκος του πυρήνα

N = Σαχύτητα περιστροφής της μηχανής.

Ο συντελεστής που φαίνεται στο διάγραμμα 136 είναι ένας αληθινός δείκτης της δυνατότητας για ισχύ στην έξοδο. Φαίνεται τόσο η μείωση του μεγέθους σε σχέση με τις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές όσο η αυξημένη πυκνότητα ρεύματος ως προς τη μαγνητική ροή σε σχέση με περιέλιξη από χαλκό.



Σχ. 6.1: Συντελεστής ισχύος για υπεραγωγίμη και συνηθισμένη ηλεκτρική

μ

η

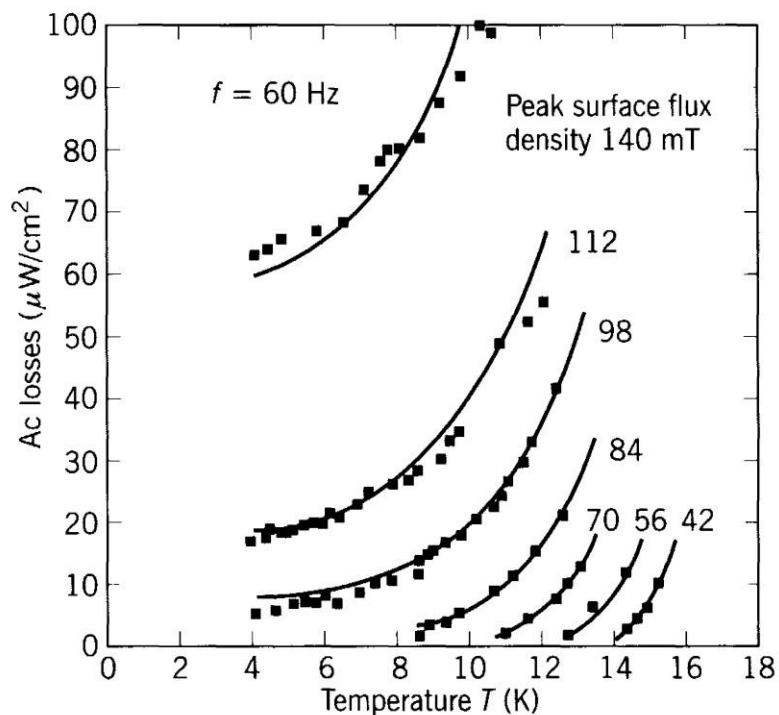
χ

α

ν

ή

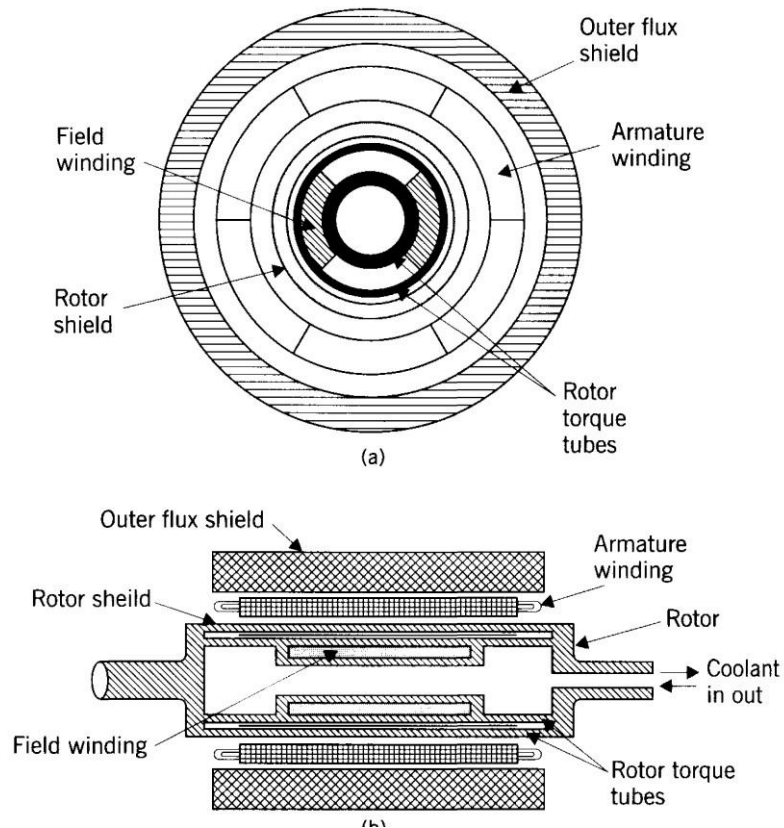
Ο στάτορας μιας υπεραγώγιμης σύγχρονης γεννήτριας περιλαμβάνει μια περιέλιξη του στάτορα και μια προστατευτική κατασκευή που παρέχει μαγνητική προστασία, μηχανική στήριξη και θερμοκρασιακή φροντίδα. Οι περιελίξεις του στάτορα υπόκεινται σε πεδία εναλλασσόμενα, τα οποία θα εισάγουν δυνωρρεύματα που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και το μέγιστο της επιφανειακής πυκνότητας ροής. Οι απώλειες AC ( $\mu W/cm^2$ ) αυξάνουν με αντίστοιχη αύξηση των μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τυπικές απώλειες σε έναν υπεραγωγό σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας και της επιφανειακής πυκνότητας ροής φαίνονται ακολούθως:



Σχ. 6.2: Συντελεστής απωλειών σε μια υπεραγώγιμη ηλεκτρική μηχανή

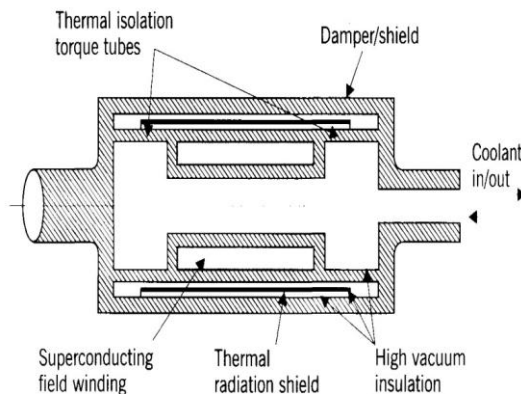
Ο δε υπεραγώγιμος κινητήρας έχει τρεις περιελίξεις: μια περιέλιξη του επαγωγίμου, μια περιέλιξη DC πεδίου, και μια περιέλιξη τοποθετημένη ανάμεσα σε αυτήν του επαγωγίμου και του πεδίου. Οι απαιτήσεις από την υπεραγώγιμη περιέλιξη πεδίου να σταθεροποιηθεί στους 4.2K ικανοποιείται από 4 σύγχρονα στοιχεία της μηχανής.

γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 128 :



Σχ. 6.3: δομή υπεραγωγίου κινητήρα

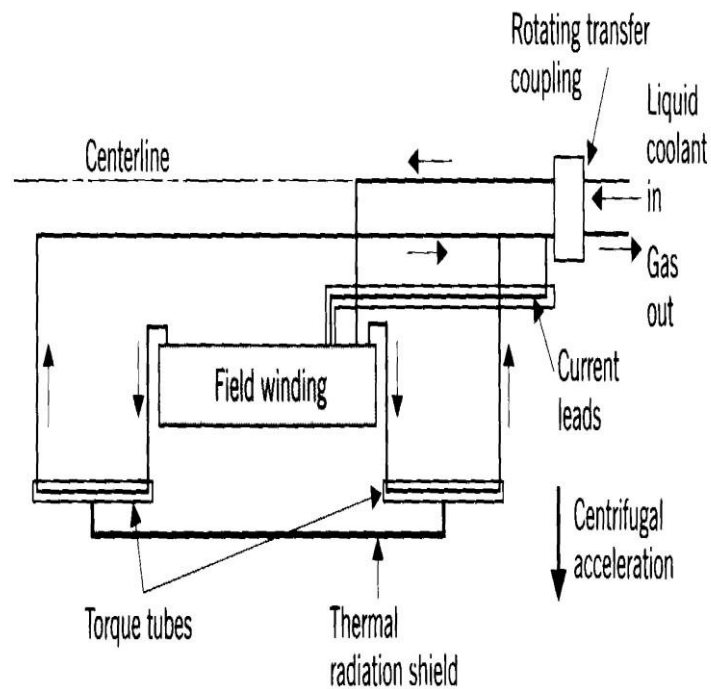
Συγκεκριμένες λεπτομέρειες στην περιέλιξη του πεδίου και σε αυτήν που βρίσκεται ανάμεσα στην περιέλιξη του επαγωγίου και του πεδίου καθώς και πληροφορίες για την ασπίδα θερμικής ακτινοβολίας για υπεραγωγίμες γεννήτριες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 6.4: δομή ψήκτρας υπεραγωγίου κινητήρα

Η ροπή της σύγχρονης μηχανής είναι ανάλογη με τα ρεύματα που δημιουργούνται. Σε κρυονικές θερμοκρασίες, το ρεύμα πεδίου είναι ακόμα μεγαλύτερο, οδηγώντας σε μια σημαντική αύξηση στην πυκνότητα ροής. Εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής ροπής σε μια υπεραγωγίμη μηχανή, η δομή του ρότορα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τις θερμικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις στους 4.2K.

Η περιέλιξη πεδίου στον ρότορα πρέπει να τροφοδοτείται συνεχόμενα με υγρό ήλιο για να διατηρηθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας κάτω από συνθήκες οποιοδήποτε φορτίου. Στο υγρό ήλιο, αφού περάσει από τις περιελίξεις του πεδίου, γυρνάει στο σύστημα ψύξης για να ανακυκλωθεί με ελάχιστες απώλειες. Συγκεκριμένες λεπτομέρειες ψύξης για περιελίξεις πεδίου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχ. 6.5: ψύξεις περιελίξεων υπεραγωγίμου κινητήρα

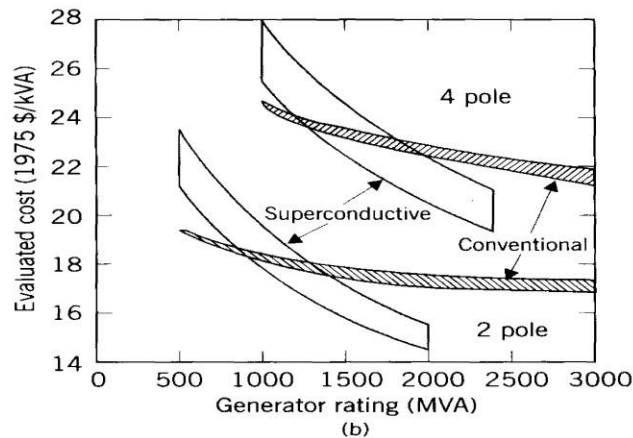
Αυτές οι υπεραγωγίμες μηχανές αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας αφού περιορίζουν τις απώλειες σημαντικά με την αυξημένη τους απόδοση, δίχως παράλληλα να αυξάνεται υπερβολικά το κόστος όπως άλλωστε φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των υπεραγωγίμων κινητήρων είναι η χρήση τους σε διαστημικές εφαρμογές αφού δε χρειάζεται καν η ψύξη τους.

|                                    | 1200 MVA <sup>a</sup><br>2-pole<br>conventional | 1200 MVA <sup>a</sup><br>2-pole<br>superconducting | 1500 MVA <sup>b</sup><br>2-pole<br>conventional | 3000 MVA <sup>b</sup><br>2-pole<br>superconducting |
|------------------------------------|---|--|---|--|
| Rated voltage (kV)                 | 26  | 34   | 27  | 27   |
| Armature outer diameter (m)        | 4.3   | 3.7  | 4.3   | 4.3  |
| Total length (m)                   | 13  | 7.2  | 15  | 11   |
| Total mass (kg)                    | 630   | 140  | 580   | 480  |
| Synchronous reactance $x_d$ (%)    | 181   | 52   | 220   | 90   |
| Transient reactance $x'_d$ (%)     | 32  | 29   | 31  | 70   |
| Subtransient reactance $x''_d$ (%) | 26  | 16   | 23  | 55   |
| Efficiency (rated load) (%)        | 98.6  | 99.4   | 98.75   | >99  |

<sup>a</sup> Data from Westinghouse.

<sup>b</sup> Data from KWU.

(a)



Σχ. 6.6: συγκριτικός πίνακας απόδοσης υπεραγωγίων γεννητριών

#### 6.4. Μαγνητικά ρουλεμάν και στρόφαλοι ισχύος

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή του φαινομένου Meissner είναι η κατασκευή ρουλεμάν δίχως τριβή, όπου ουσιαστικά το σώμα θα κινείται στον αέρα χάρη στη μαγνητική ανύψωση.

Τα μαγνητικά ρουλεμάν έτσι θα έχουν πολύ λιγότερες απώλειες ενέργειας από τα μηχανικά, ειδικά αυτά που έχουν κατασκευαστεί από κεραμικούς υπεραγωγούς. Επιπλέον προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού θορύβου αλλά και της φιλικότητας ως προς το περιβάλλον αφού δε χρησιμοποιούνται λιπαντικά. Η πιο απλή μορφή ενός τέτοιου ρουλεμάν είναι η σύνδεση ενός ρότορα σε έναν υπεραγωγίμο μαγνήτη.

είναι αυτά με κρίσιμο σημείο κοντά στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου. Σήμερα είναι πιθανή η ανύψωση ενάντια σε πιέσεις μέχρι και 300kPa ,κάτι που είναι αρκετό για μερικές εντυπωσιακές επιδείξεις όπως μια στην Ιαπωνία στην οποία ανυψωνόταν ένας παλαιστής σούμο.

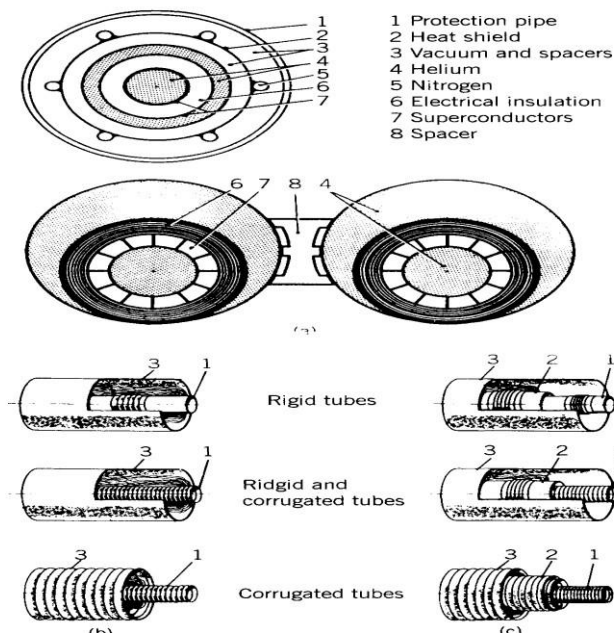
Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των μαγνητικών ρουλεμάν είναι η κατασκευή στροφάλων για ενεργειακή αποθήκευση. Ένα μεγάλο πρόβλημα των στροφάλων για χρήση τους ως αποθηκευτές ενέργειας είναι οι απώλειες μέσω ρουλεμάν. Χρησιμοποιώντας όμως υπεραγωγία ρουλεμάν αυτές οι απώλειες μπορούν να μηδενιστούν. Αυτές οι εφαρμογές των υπεραγωγών αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(ΑΠΕ) και χρησιμοποίησής τους σε περιόδους αιχμής, καθότι ένας υπεραγωγίμος μαγνήτης μπορεί να διατηρήσει την μαγνήτισή του για ένα αξιόλογο χρονικό διάστημα. Μάλιστα πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των υπαρχουσών λύσεων(παραγωγή υδρογόνου, αντίστροφα υδροηλεκτρικά, αέρας υπό πίεση) καθότι δεν έχουν απώλειες κατά την αποθήκευση ενέργειας. Η πιο εξωτική μάλιστα χρήση που τους έχει προταθεί είναι η χρησιμοποίησή τους για αποθήκευση ενέργειας στο διάστημα από τα φωτοβολταϊκά.

#### 6.5. Υπεραγωγίμο ηλεκτρικό δίκτυο

Από όλες τις εφαρμογές των υπεραγωγών, η χρήση τους στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να είναι η πιο επαναστατική. Στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο εμφανίζει αρκετά προβλήματα: έχει αρκετές απώλειες λόγω του φαινομένου Joule, όταν είναι εναέριο καταναλώνει χώρο, φθείρεται εύκολα λόγω κεραυνών και υπάρχει ήδη διαμάχη για το αν εκπέμπει ακτινοβολία που προκαλεί βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό. Όταν δε είναι υπόγειο, απαιτεί έξοδα λόγω της τοποθέτησής τους και η ψύξη τους κρίνεται ανταποδοτική. Επίσης, ανεξαρτήτως θέσης των καλωδίων η ροή ρεύματος που μπορούν να μεταφέρουν κρίνεται μικρή με βάση την υπάρχουσα ζήτηση. Όλα αυτά ωστόσο αναμένεται να αλλάξουν με ένα υπεραγωγίμο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα υπεραγωγίμο καλώδιο είναι ένα καλώδιο με εξωτερική μόνωση θερμική και ηλεκτρική που το αγώγιμο υλικό είναι υπεραγωγός ψυχόμενος σε θερμοκρασία κάτω του κρίσιμου σημείου. Μάλιστα το ψυκτικό μέσο περνάει μέσα από το καλώδιο αφού το υπεραγωγίμο υλικό έχει μορφή δακτυλίου.





Σχ. 6.7: Δομή υπεραγωγίων καλωδίων

Απαιτεί μάλιστα κρυογονική ψύξη για όλο το μήκος της υπεραγωγίμης γραμμής. Η οικονομική λειτουργία απαιτεί το ψυκτικό μέσο(ήλιο ή άζωτο) να γυρίζει στο σύστημα ψύξης για επανάψυξη χωρίς απώλεια του μέσου. Ακόμη περισσότερο , ένα υπεραγωγίμο καλώδιο με υψηλή σχέση επιφάνειας προς όγκο είναι καθοριστικό για μεγάλη απόδοση ψύξης. Σε ένα υπεραγωγίμο καλώδιο με ισχύ της τάξης των 5000MW , το καλώδιο πρέπει να περικλείεται σε κρυογονικό περιβάλλον όπου το ψυκτικό υγρό θα ρέει στο χώρο έξω από το καλώδιο αλλά μέσα στο ψυκτικό περίβλημα. Το κρυογονικό περίβλημα αποτελείται από ένα εσωτερικό σωλήνα που περιβάλλεται από πολλά επίπεδα θερμικής μόνωσης και κενό. Ο χώρος όπου εισρέει το ψυκτικό υγρό πρέπει να καθοριστεί παίρνοντας υπόψιν πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος: Στο κόστος των ψυκτικών μέσων, το κόστος του κρυογονικού περιβλήματος, και την αποδεκτή αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού. Στο μέγεθος του καλωδίου είναι απευθείας ανάλογο από τη δυνατότητα μεταφοράς ρεύματος του υπεραγωγού, απαιτήσεις σταθεροποίησης, και το ποσό της ηλεκτρικής μόνωσης που απαιτείται.

Σε AC υπεραγωγίμα καλώδια , μεγάλο μέγεθος καλωδίου και κρυογονικό περίβλημα είναι απαραίτητα. Αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν το συνολικό κόστος στην κατασκευή και λειτουργία των AC υπεραγωγίων καλωδίων δείχνουν ότι τα DC καλώδια είναι οικονομικότερα.

Επίσης στα DC καλώδια το κόστος των μετατροπέων που βρίσκονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς υπολογίζεται στο 60% σύμφωνα με μελέτες της Philadelphia Electric Company. Η μελέτη συμπεριλαμβάνει το γεγονός ότι χαμηλότερο κόστος γραμμής θα κάνουν τη DC γραμμή περισσότερο ελκυστική για καλώδια μικρότερα από 200Km σε μήκος.

Τα υπεραγώγιμα καλώδια επιτρέπουν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις δίχως απώλειες. Παράλληλα, επειδή μεταφέρει μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος χρειάζονται λιγότερες γραμμές μεταφοράς, γεγονός που οδηγεί και σε εξοικονόμηση χώρου.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των υπεραγώγιμων καλωδίων είναι πως η χαμηλή τους θερμοκρασία λόγω ψύξης δεν επιτρέπει την ανάφλεξή τους όπως στα συμβατικά, εκμηδενίζοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Τέλος δε θα χρειάζονται μετατροπείς του ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές και αντίστροφα, αφού δε θα υπάρχουν απώλειες. Το υπεραγώγιμο δίκτυο αναμένεται να παίξει καθοριστικό ρόλο με την αύξηση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα βασικό πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ είναι πως η παραγωγή βρίσκεται μακριά από την κατανάλωση(κυρίως αστικά κέντρα). Υπολογίζεται μάλιστα πως στις ΗΠΑ οι απώλειες λόγω του φαινομένου Joule κατά τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος αγγίζουν το 6 με 7% της συνολικής παραγόμενης ισχύος<sup>9</sup>. Με τα υπεραγώγιμα καλώδια και τη μεταφορά ρεύματος δίχως απώλειες είναι δυνατή η μεταφορά μεγάλης ηλεκτρικής ισχύς σε αστικά κέντρα όταν η πηγή μπορεί να βρίσκεται χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά. Έτσι, φωτοβολταϊκά στην Σαχάρα θα μπορούσαν να μεταφέρουν ρεύμα στην Ευρώπη ή αιολικά πάρκα στην Σιβηρία να μεταφέρουν ρεύμα στο Πεκίνο.

Σο 1977, η εταιρία Philadelphia Electric ερευνούσε την υπόγεια μετάδοση ηλεκτρικής ισχύς 10000MW σε μια απόσταση 106Km. Δεκαέξι συστήματα μεταφοράς ήταν υπό σκέψη συμπεριλαμβανομένων ένα DC και 2 AC υπεραγώγιμων συστημάτων μεταφοράς ισχύος. Σα αποτελέσματα από αυτή την έρευνα έδειξαν ότι το εναλλασσόμενο υπεραγώγιμο καλώδιο που λειτουργούσε στους 4.2K ήταν η οικονομικότερη λύση από όλα τα υπόγεια συστήματα μεταφοράς. Επίσης η συνεχής υπεραγώγιμη γραμμή βαθμολογήθηκε δέκατη σε κόστος. Σο κόστος των μετατροπέων υπολογίστηκε περίπου το 60% του συνολικού κόστους, που σημαίνει ότι το DC υπεραγώγιμο καλώδιο που λειτουργεί στους 4.2K είναι πιο ελκυστικό για μεγάλες γραμμές μεταφοράς. Με τους υπεραγωγούς υψηλών θερμοκρασιών που δουλεύουν σε θερμοκρασίες πολύ άνω των 4.2K, αναμένεται πως ακόμα και τα DC υπεραγώγιμα καλώδια θα είναι φθηνότερα των συμβατικών.

Τον Ιούλιο του 2008, η εταιρία BOC Group στο New Jersey και οι συνεργάτες της εγκατέστησαν 350 μέτρα πειραματικού υπεραγωγίου δικτύου στο ηλεκτρικό δίκτυο της Albany, N.Y. Σο ψυχόμενο με άζωτο δίκτυο θα μεταφέρει μέχρι και 48MW.<sup>4</sup>

#### 6.6. Υπεραγωγοί Μαγνήτες στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών.

Έχουν γίνει μεγάλοι πρόοδοι στην Φυσική τοιχειωδών σωματιδίων τα τελευταία χρόνια με την ανίχνευση σωματιδίων τα οποία είχαν προβλεφθεί πειραματικά τις προηγούμενες δεκαετίες.

Οι κυριότερες πειραματικές εγκαταστάσεις φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων είναι το CERN στη Γενεύη και το Fermilab στο Σικάγο. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση δεσμών στοιχειωδών σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες. Ο έλεγχος και η επιτάχυνση αυτών των δεσμών γίνεται αποκλειστικά μέσω υπεραγωγίων μαγνητών (Nb<sub>3</sub>Sn), οι οποίοι προσφέρουν πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία και υψηλή σταθερότητα.

Στη νέα διάταξη σύγκρουσης δεσμών πρωτονίων- πρωτονίων στο CERN, με το όνομα Large Hadron Collider (LHC) που θα έχει ως στόχο την επαλήθευση της εύρεσης του σωματιδίου που είναι φορέας της βαρυτικής ενέργειας (μποζόνιο του Higgs) πρωτόνια αναμένεται να επιτευχθούν μέχρι να φθάσουν ενέργειες 14 TeV μέσω μαγνητικού πεδίου της τάξης των 12T. Αυτές οι ενέργειες στο «πείραμα του αιώνα» όπως έχει χαρακτηριστεί θα ήταν πλήρως αδύνατο να επιτευχθούν δίχως τη χρήση υπεραγωγίων μαγνητών.

#### 6.7. Υπεραγωγοί Μαγνήτες στους Αντιδραστήρες Σύντηξης.

Αναντίρρητα το πιο σημαντικό πείραμα στην ιστορία του 21<sup>ου</sup> αιώνα αναμένεται να λάβει στο Cadarache στη Νότια Γαλλία. Εκεί θα γίνει προσπάθεια να επιτευχθεί ο πρώτος σταθμός (ITER) που θα παράγει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω σύντηξης.

Η σύντηξη παράγει ισχύς καθώς δύο άτομα υδρογόνου ενώνονται σχηματίζοντας ένα άτομο ηλίου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας φθηνά, σταθερά και δίχως επικίνδυνα απόβλητα. Απαραίτητο στην όλη διαδικασία είναι η επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας (περίπου ~15MK). Αυτό αναμένεται να γίνει μέσω πλάσματος το οποίο θα ελέγχεται μέσω τεράστιων υπεραγωγίων μαγνητών (από Nb<sub>3</sub>Sn) της τάξεως των 13.5Σ.

Όπως φαίνεται οι υπεραγωγοί αναμένεται να είναι στο επίκεντρο όλων της ενεργειακής επανάστασης που ετοιμάζει ο άνθρωπος.

### 6.8. Ιπτάμενα Τραίνα(MAGLEV)

Πρόκειται για την πιο γνωστή χρήση των υπεραγωγών. Τα ιπτάμενα τραίνα είναι τραίνα τα οποία κινούνται στον αέρα πάνω από ράγες δίχως να τις αγγίζουν χάρη στο φαινόμενο Meissner. Η κίνησή τους δίχως τριβή προσφέρει τη δυνατότητα κίνησης σε πολύ υψηλές ταχύτητες (μέχρι και 550km/h) με λιγότερες απώλειες ενέργειας και δίχως κραδασμούς και θόρυβο.



Σχ. 6.8: τραίνο maglev στην Ιαπωνία

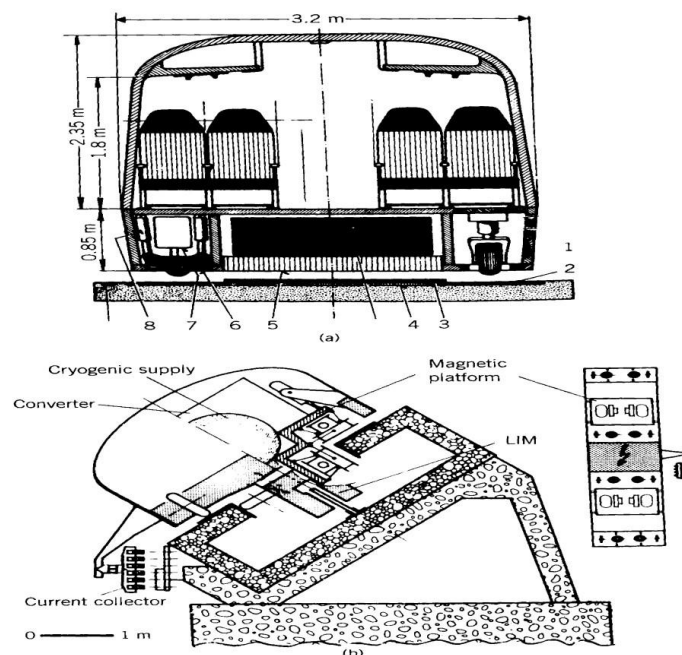
Τα πιο προγράμματα σημαντικά έρευνας και ανάπτυξης σε ηλεκτροδυναμικά συστήματα ανύψωσης αναπτύχθηκαν από τη Γερμανία και την Ιαπωνία στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Οι Γερμανοί χρησιμοποίησαν μια 280m διαμέτρου κυκλική τροχιά για να δοκιμάσουν το είκοσι τόνων δοκιμαστικό όχημα, Erlangen. Οι εικόνες τόσο του γερμανικού οχήματος όσο και του ιαπωνικού φαίνονται στο σχήμα 6.16. Στο γερμανικό δοκιμαστικό όχημα έδειξε μια ταχύτητα από 150Km/h σε μια απόσταση μεγαλύτερη από 1000Km με τέσσερις υπεραγωγίμους μαγνήτες να αλληλεπιδρούν με δυο σειρές από επιφάνειες αλουμινίου που έχουν τοποθετηθεί στην επιφάνεια μιας ευθύγραμμης τροχιάς.

Σο κέντρο έρευνας της εταιρίας Siemens το 1979 ανέπτυξε δοκιμές ανύψωσης χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό σύγχρονο κινητήρα(ΓΣΚ) με περιέλιξη οπλισμού 3 – φάσεων στο πάτο του οχήματος.

Ο ΓΣΚ ανέπτυξε μια ώθηση περίπου 4500 lb , επιταχύνοντας το τρένο σε μέγιστη ταχύτητα 150km/h. Ανταγωνιστικά συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης ανακαλυφθήκαν τη δεκαετία του 1980 με δυνατότητες ταχύτητας μεταξύ 300 και 400km/h.

Το πρόγραμμα του συστήματος ανύψωσης του ιαπωνικού σιδηρόδρομου κατάφερε να φέρει αποτελέσματα γύρω στο 1975. Οι έρευνες έδειξαν μια δυνατότητα ταχύτητας 517km/h σε μια 7km γραμμική τροχιά χρησιμοποιώντας ένα 13m μακρύ όχημα που ζύγιζε 10 τόνους. Στο ανυψωθέν όχημα τρένο ήταν εφοδιασμένο με 8 υπεραγωγίσιμους μαγνήτες ( 4 μαγνήτες για ανύψωση και 4 για προώθηση). Η ψύξη των υψηλής ισχύος υπεραγωγίσιμων μαγνητών επιτεύχθηκε με ανεφοδιασμό των κρυστατών υγρού ηλίου ανάμεσα στις διαδρομές δοκιμής. Αργότερα επιτεύχθηκε η ταχύτητα των 520km/h με τρία οχήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους σε μια ευθεία διαδρομή 25km. Ο ιαπωνικός σιδηρόδρομος εισήγαγε τα τρένα σφαίρες γύρω στο 1985 μεταξύ μεγάλων πόλεων με ταχύτητες που ξεπερνούν τα 300km/h, βασισμένα στη τεχνολογία του συστήματος ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης. Το Μάρτιο του 1997 , παρουσίασε το ταχύτερο τρένο στο κόσμο με ταχύτητα που φτάνει τα 550Km/h.

Η λειτουργία ενός ηλεκτροδυναμικού υπερυψωμένου τρένου απαιτεί οι υπεραγωγίσιμοι μαγνήτες να είναι διατεταγμένοι κατά μήκος και από τις δυο πλευρές στο κάτω μέρος του οχήματος όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα



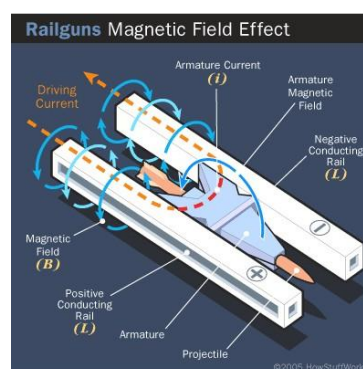
Σχ. 6.9: Μέρη Maglev

Η συγκεκριμένη τροχιά είναι εφοδιασμένη με συνεχόμενο λεπτό στρώμα από αλουμίνιο ακριβώς κάτω από τους υπεραγωγίμους μαγνήτες. Βρόχοι ή σπείρες με κατάλληλες διαστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί του στρώματος αλουμινίου. Η ροή που παράγεται από τον υπεραγωγίμο μαγνήτη διεισδύει στο στρώμα αλουμινίου κάθετα προς τα κάτω και παράγει ρεύματα στο στρώμα αλουμινίου όταν το όχημα κινείται κατά τη διαμήκη πορεία του. Η αλληλεπίδραση με τα ρεύματα από την υπεραγωγίμη σπείρα παράγει μια αντίθετη δύναμη που σηκώνει το όχημα πάνω από τη τροχιά. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες (μικρότερες από 50Km/h) ή όταν είναι στάσιμο, η δύναμη ανύψωσης δεν υφίσταται και το όχημα πρέπει να υποστηριχθεί από τους τροχούς προκειμένου να μετακινηθεί.

#### 6.9. Πολεμικές εφαρμογές.

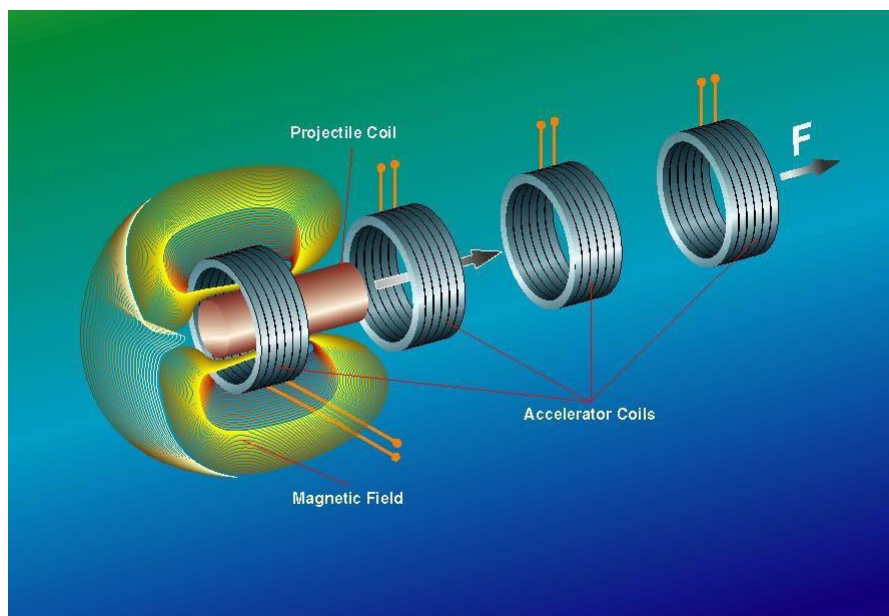
Δυστυχώς ο Goethe είχε απόλυτο δίκιο όταν έλεγε «Δύο πράγματα μου δίνουν την αίσθηση του απείρου. Στο σύμπαν και η ανθρώπινη βλακεία. Και για το πρώτο δεν είμαι σίγουρος». Αντί λοιπόν η ανθρωπότητα να αναπτύσσει τις ειρηνικές εφαρμογές των υπεραγωγών, προτιμά να κατασκευάζει όπλα με αυτούς. Μερικά από τα όπλα αυτά είναι το rail gun, τα όπλα Gauss και οι “E-bombs”.

Η λειτουργία του rail gun όπως φαίνεται είναι σχετικά απλή. Σε δύο μαγνήτες αντίθετης πολικότητας της μορφής καλωδίων, παράλληλα μεταξύ τους, τοποθετείται ένα βλήμα το οποίο ακουμπά και στους δύο. Καθώς λοιπόν ακουμπά και στους δύο, λειτουργεί ως διακόπτης που κλείνει το κύκλωμα και του ασκείται άμεσα μια δύναμη Lentz που το επιταχύνει μέχρι να εκτοξευθεί. Στο αμερικανικό ναυτικό έχει κάνει πειράματα με υπεραγωγούς που επιταχύνουν βλήματα τριών κιλών(3kg) μέχρι ταχύτητες επτά Mach(7 Mach).



Σχ. 6.10: Απεικόνιση λειτουργίας rail gun

Τα όπλα Gauss είναι ακόμα πιο απλά. Μαγνητικές σπείρες επιταχύνουν ένα μεταλλικό βλήμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Σχ. 6.11: Απεικόνιση λειτουργίας Gauss gun

Τα όπλα αυτά τα οποία ανακαλύφθηκαν από τον Νορβηγό Kristian Birkeland και ονομάστηκαν όπλα Gauss προς τιμήν του Γερμανού Μαθηματικού Gauss που περιέγραψε πρώτος το φυσικό φαινόμενο στο οποίο στηρίζονται, κυκλοφορούν κάνοντας χρήση κανονικών μαγνητών. Το αμερικανικό Ναυτικό έχει χρηματοδοτήσει την εταιρία Boeing για πιθανές έρευνες χρήσης κανονιών Gauss με υπεραγωγίμους μαγνήτες στα πλοία.

Στις 25/3/2003 το αμερικάνικο τηλεοπτικό δίκτυο CBS μετέδωσε πως έπεσε στο Ιράκ κατά τη διάρκεια της αμερικάνικης εισβολής η πρώτη “E-bomb”, ένας πειραματικός ηλεκτρομαγνητικός παλμός προκειμένου να καταστραφεί ο δορυφορικός τηλεοπτικός του Ιράκ που μετέδιδε 24 ώρες το εικοσιτετράωρο.

Η βόμβα αυτή, σύμφωνα με το περιοδικό Popular mechanics στηρίζεται σε ένα υπεραγωγίμο πηνίο το οποίο με την χημική πυροδότηση της βόμβας απελευθερώνει ένα τρομακτικό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε ελάχιστο χρονικό διάστημα και δημιουργώντας έναν πανίσχυρο ηλεκτρομαγνητικό παλμό, ικανό να καταστρέψει κάθε τι ηλεκτρονικό σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων.

## 7. Τελικά Συμπεράσματα

Μετά το πέρας όλων των κατεργασιών, των μετρήσεων και των χαρακτηρισμών, μπορούμε να πούμε ότι η έλαση μορφής ως κατεργασία διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς με την τεχνική ΡΙΤ.

Η επιλογή των υλικών φάνηκε ορθή και καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το αλουμίνιο και γενικά τα πλέον όλκιμα μέταλλα είναι ιδανικά για αυτού του είδους κατεργασίες.

Οι δυνάμεις, οι τάσεις και η ισχύς δεν ξεπέρασαν σε καμία περίπτωση τα επιτρεπτά για την βιομηχανία και όχι μόνο όρια, καθώς ως ψυχρή κατεργασία έπρεπε να εξετασθεί το κατά πόσο μπορεί να είναι και οικονομική. Παράλληλα, οι γεωμετρίες που παρατηρήθηκαν ήταν καλές, παρ' όλο που δεν χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις που υπάρχουν στην βιομηχανία.

Μετέπειτα, στους χαρακτηρισμούς δεν είδαμε κάτι ξεχωριστό, απλώς επιβεβαιώθηκε θα λέγαμε η βιβλιογραφία στην οποία όλα έβαιναν καλώς, με ελάχιστες ακαθαρσίες, ανεπιθύμητες εισχωρήσεις και καλή σχετικά πρόσφυση των υλικών μας.

Συνοψίζοντας λοιπόν, θα λέγαμε ότι οι στόχοι που είχαμε θέσει στην αρχή του πειράματος επιτεύχθηκαν και συγκεκριμένα

- I. Μετά το τέλος της κατεργασίας είχαμε σαν τελικό προϊόν λειτουργικά προϊόντα, στην επιθυμητή δομή με την σκόνη του διβορίδιου του μαγνησίου να έχει γίνει ένα σώμα όπως ακριβώς θέλαμε.
- II. Η διεργασία ήταν σχετικά γρήγορη και σαφώς οικονομική σε κόστος καθώς για το κάθε τεμάχιο χρειάστηκε χρόνος 35 δεύτερα για την διαδικασία της έλασης μορφής ενώ και το κόστος και ο χρόνος παραγωγής των μπιγιετών του αλουμινίου είναι μικρός.
- III. Οι κατευθυντήριοι άξονες πάνω στους οποίους κινηθήκαμε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι οι εξής:
  1. Να παράγουμε λειτουργικά τελικά τεμάχια σε άρτια μορφή και χωρίς σημαντικές φθορές
  2. Να χρησιμοποιήσουμε όσο γίνεται πιο οικονομική και γρήγορη διεργασία για την παραγωγή των τελικών τεμαχίων. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ βασικός και καθοριστικός σχετικά με τις αποφάσεις παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες.
  3. Η σκόνη να συμπιεστεί επαρκώς εως μια μορφή η οποία να είναι αποδεκτή
  4. Να καθορίσουμε το στάδιο της κατεργασίας στο οποίο θα πετύχουμε την αρτιότερη συμπίεση
  5. Βελτιστοποίηση τελικού τεμαχίου με τον καθορισμό της διαμέτρου της οπής στην μπιγιέτα για την πλήρωσή της με την σκόνη του διβορίδιου του Μαγνησίου
  6. Να εξαλείψουμε όσο το δυνατόν γίνεται τους παράγοντες της τυχαιότητας των τελικών



δοκιμίων.

7. Να αξιολογήσουμε τα τελικά προϊόντα με την μέθοδο της οπτικής παρατήρησης καθώς και με τον έλεγχο σκληρότητας της τελικής μορφής της σκόνης.

Κλείνοντας, μπορούμε να πούμε ότι η έλαση μορφής ενδείκνυται να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική PIT, καθώς με βέλτιστες συνθήκες (για ακρίβεια) αποτελεί την πιο γρήγορη, απλή και μικρού κόστους κατεργασία διαμόρφωσης κοκκωδών υλικών σωληνοειδούς μορφής.

## 8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Σαν μελλοντική έρευνα θα ήταν ενδιαφέρον

- Να γίνει σύγκριση του MgB<sub>2</sub> παρασκευασμένο με διέλαση αντί έλαση μορφής και τις διαφορές τους σε μικρομηχανικό επίπεδο καθώς και σε επίπεδο υπεραγωγίων ιδιοτήτων.
- Να γίνει υπολογιστική προσομοίωση της έλασης μορφής καθώς και της διέλασης με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τα πειραματικά δεδομένα.
- Η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου σε σκόνη άλλων υπεραγωγών (πχ TBCCO) και η εξαγωγή συμπερασμάτων από την σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά υλικά.

## 8. Βιβλιογραφία

### Ελληνική

1. Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Αθήνα 2008
2. Δ. Ι. Παντελής, Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Αθήνα 2008
3. Δ. Ε. Μανωλάκος, Κατεργασίες Ι, Βιβλίο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2010
4. Δ. Ε. Μανωλάκος, Καθ. ΕΜΠ, Σημειώσεις από το μάθημα «Τεχνικά Υλικά» της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
5. Αθ. Γ. Μάμαλης, Κατεργασίες των Υλικών, Αθήνα 1989
6. Μ. Μπουρουσιάν, Χημεία Στερεάς Κατάστασης, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2005
7. Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Αθαν. Γ. Μάμαλη, Αθήνα 1996
8. Χ. Παναγόπουλος, Τεχνολογία Επιφανειών, ΕΜΠ, Αθήνα
9. Δ. Τσακίρη, Κατεργασίες κράματος αλουμινίου με Laser, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
10. Αλ. Αθανασίου-Ιωάννου, Μορφοποίηση του υπεραγωγού MgB<sub>2</sub> με τη μέθοδο PIT και χαρακτηρισμός του, ΕΜΠ, Αθήνα 2010
11. Α. Κοντόπουλος, Εισαγωγή στα πυρίμαχα υλικά, Επιστημονικές εκδόσεις ΕΜΠ, 1983
12. Αθ. Γ. Μάμαλης, Κατεργασίες των Υλικών: Μη συμβατικές κατεργασίες, Αθήνα 2000
13. Πτυχιακή εργασία, Κρυοτρονική και Τπεραγωγιμότητα , Λουκάς Υουσέκης-Ευαγγελίου, ΣΕΙ Αθήνας, 2000.

### Ξένη

14. P. J. Ford, G. A. Saunders, The Rise of the Superconductors, CRC Press, 2005.
15. T. Udomphol, Rolling of metals, Suranaree University of Technology, 2007
16. S. Behzadipour, A. Khajepour, J. G. Lenard, J. Biglou, A new shape change quantification method for estimation of power in shape rolling, Materials Processing Technology, Elsevier 2004
17. S. Riljak, Numerical Simulation of Shape Rolling, Royal Institute of Technology, Stockholm 2006
18. J. R. Pickens, Review: Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications Journal of Material Science, 1981
19. S.-H. Kim, Y.-T. Im, A knowledge-based expert system for roll pass and profile design for shape rolling of round and square bars, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier 1999
20. M. Guden, H. Kavi, Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes, Thin Walled Structures, Elsevier 2006
21. D. G. Hinks , J. D. Jorgensen, H. Zheng, S. Short, Synthesis and stoichiometry of MgB<sub>2</sub>, Materials Science Division, Argonne National Laborator
22. S. Zhou, A. V. Pan, H. Liu, S. Dou, Single- and multi-filamentary Fe-sheathed MgB<sub>2</sub> wires, Elsevier, 2002
23. V. F. Nesterenko, Bulk Magnesium Diboride – Mechanical and

Superconducting Properties, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD Materials Science and Engineering Program, University of California, San Diego

24. D. K. Aswal, K. P. Muthe, Ajay Singh, Shahswati Sen, Kunjal Shah, L.C. Gupta, S.K. Gupta, V.C. Sahni, Physica C, Degradation behavior of MgB<sub>2</sub> superconductor, Elsevier, 2001
25. Superconductor technology: Applications to microwave , electro-optics, electrical machines and propulsion systems, A.R.Jha, (1998), 1st Edition, United States of America, John Wiley & Sons, Inc.
26. SUPERCONDUCTIVITY AND CRYOGENICS FOR THE LARGE HADRON COLLIDER, Ph. Lebrun, LHC Project Report 441.
27. Rail Gun. (2009). In Wikipedia. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>
28. Gauss Gun. (2009). In Wikipedia. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>.
29. [http://science.nasa.gov/headlines/y2003/05feb\\_superconductor.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2003/05feb_superconductor.htm)
30. <http://superconductors.org/emp-bomb.htm>

